Complejidad y Caos:
Una exploración antropológica

Carlos Reynoso
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
billyreyno@hotmail.com
http://carlosreynoso.com.ar
© 2006

1. Introducción 4
2. Las grandes teorías de sistemas complejos 11
2.1 – Tipificación epistemológica: Los cuatro modelos 12
2.2 – El fundamento común de las teorías de sistemas: Teoría de la Información 18
2.3 – Cibernética 23
2.3.1 – Mecanismos de control y retroalimentación 23
2.3.2 – Aplicaciones antropológicas 27
2.3.2.1 – Gregory Bateson y la esquismogénesis 27
2.3.2.2 – Sistemas sociales autorregulados: Siegfried Nadel 39
2.3.2.3 – La Ecosistémica de Roy Rappaport 40
2.3.2.4 – Críticas y alternativas procesuales a la ecosistémica 43
2.4 – La teoría general de sistemas 48
2.4.1 – Sistemas generales 48
2.4.2 – Teorías de los sistemas sociales y vivientes 53
2.4.3 – Aplicaciones de la TGS en ciencias sociales 56
2.5 – Estructuras disipativas y cibernética tardía 59
2.5.1 – Sistemas alejados del equilibrio 59
2.5.2 – La flecha del tiempo: Críticas al modelo de Prigogine 64
2.5.3 – Autopoiesis y Enacción: Maturana y Varela 71
2.5.4 – La realidad negada: Constructivismo radical 83
2.5.5 – Estructuras disipativas en la cultura: Adams 85
2.5.6 – Paisajes mentales : El Modelo de Maruyama 87
2.5.7 – El desorden: Balandier y la morfogénesis de la Antropología Dinámica 92
2.5.8 – La investigación social de segundo orden 95
2.5.9 – La sociología autopoiética de Niklas Luhmann 99
2.6 – Teoría de catástrofes 104

2.6.1 – Singularidades: estabilidad estructural y morfogénesis 104
2.6.2 – Teoría de catástrofes en ciencias sociales 109
2.7 – Los paradigmas discursivos de la complejidad 113
3. Los algoritmos de la complejidad 125
3. 1 – Emergentes: Sistemas complejos adaptativos 125
3.1.1 – Autómatas celulares y vida artificial 126
3.1.2 – Autómatas celulares en ciencias sociales 135
3.1.3 – Auto-organización en Redes Booleanas Aleatorias 143
3.1.4 – RBA, agentes y sociedades artificiales en Antropología 146
3.2 – Conexionismo: Redes neuronales 153
3.2.1 – El paradigma conexionista de la inteligencia artificial 153
3.2.2 – Redes neuronales en Antropología 158
3.3 – El Algoritmo Genético y otras técnicas evolutivas 160
3.3.1 – La teoría de la evolución como heurística algorítmica 160
3.3.2 – Aplicaciones de algoritmos genéticos en Antropología 168
4. Caos y complejidad 174
4.1 – Caos: Teoría y práctica 174
4.2 – Caos y criticalidad auto-organizada en las ciencias sociales 190
4.3 – Medidas y definiciones de la complejidad 198
4.4 – La contienda entre el caos y la complejidad 204
4.5 – Teorías del caos y posmodernismo 209
5. Fractales: La geometría del caos 216
5.1 – El significado conceptual de los fractales 216
5.2 – Las geometrías de la naturaleza (y la cultura) 218
5.2.1 – Curvas monstruosas y dimensiones fraccionales 221
5.2.2 – Agregación limitada por difusión y movimiento browniano 222
5.2.3 – Recursividad: El eterno y grácil bucle 224
5.2.4 – El juego del caos: Sistemas de funciones iteradas (IFS) 227
5.2.5 – Systemas-L: las gramáticas recursivas del crecimiento 230
5.2.6 – Mosaicos periódicos y autómatas teselares 234
5.2.7 – Fractales clásicos, imaginarios y complejos 236
5.2.8 – Atractores extraños y biomorfos 238
5.2.9 – Patrones fractales en Arqueología y Antropología Sociocultural 239

6. Conclusiones 245
7. Indice de figuras 263
8. Herramientas de modelado utilizadas 265
9. Referencias bibliográficas 268

1. Introducción

> No sé cómo haces tú, pero yo generalmente me rindo ya en la salida. Los problemas más sencillos que aparecen día a día me parecen casi imposibles de resolver en cuanto intento buscar bajo la superficie.
>
> BILLINGS LEARNED HAND
> Citado por Weinberg (1984: 123)

La teoría de la complejidad (que engloba la teoría de los sistemas adaptativos complejos, la dinámica no lineal, la teoría de los sistemas dinámicos, la teoría del no-equilibrio y la teoría del caos) ha sido descripta como la tendencia científica dominante surgida en la década de 1990, un aporte capaz de explicar cualquier sistema complejo en función de unas pocas reglas (Lewin 1992), o de acometer los problemas inabordables de la ciencia social; un saber a la altura de los tiempos, una genuina nueva ciencia (Merry 1995), la gran idea del momento (McGlade 2003: 111), una nueva clase de ciencia (Wolfram 2002), la próxima gran revolución científica (Sprott 1993: 476), una fuente de discernimiento que afectará la vida de todos los que viven en el planeta (Brockman 2000: 14), un giro en la concepción del mundo (Dent 1999), un modelo que cambió la dirección de la ciencia para siempre (Strogatz 2003: 179) y una revolución sólo comparable a la teoría de la relatividad o a la mecánica cuántica (Gleick 1987: 6). Pero también se la considera una moda pasajera que ha recibido más promoción de la que merece (Sardar y Ravetz 1994), un modelo que se ha impuesto en virtud de una buena táctica de relaciones públicas (Dresden 1992), un espacio invadido por personas que se sienten atraídas por el éxito más que por las ideas (Ruelle 1991: 72), un *bluff* que pretende resucitar una ciencia moribunda a fuerza de superlativos e hipérboles, y una empresa abocada al fracaso que no ha dicho nada acerca del mundo que sea a la vez concreto y sorprendente (Horgan 1996: 245-287).

La realidad parece estar en algún punto entre esos extremos, pues si bien es verdad que las ciencias de la complejidad constituyen un espacio de investigación en crecimiento sostenido, todavía no existe nada que se asemeje a una teoría unificada o a un conjunto de acuerdos sustanciales, y al lado de hallazgos espectaculares subsisten fuertes dudas sobre la practicabilidad de buena parte del proyecto. Las polémicas dentro y fuera son feroces, y las operaciones de prensa y las maniobras de cooptación por parte de científicos, grupos e instituciones están a la orden del día. En esta introducción y en el resto del texto habrá que ir alternativamente examinando propuestas de auténtico provecho y callejones sin salida, avances y atolladeros, contribuciones y simulacros. La exploración que aquí se inicia tendrá que argumentar sus razones acompañada de ese penetrante ruido de fondo.

Como sea, hay que dar por sentado desde el inicio que en las ciencias y en las matemáticas de avanzada abundan estrategias y algoritmos diseñados para abordar la complejidad, y que en los últimos años el tema parece haber estallado en la academia y en los medios. Desde las ciencias sociales, algunos piensan que semejantes modelos deberían ser opciones de preferencia, en detrimento de epistemologías que de antemano se saben impropias frente a las complicaciones constitutivas de nuestros objetos. Los estudiosos más proclives a una cien-

cia ortodoxa, en cambio, advierten con alarma la afinidad entre esas nuevas ideas y las de corrientes más o menos anticientíficas que todavía gozan de mucha prensa como el posmodernismo, el constructivismo radical, los estudios culturales, los poscoloniales y los multiculturales. En estos "estudios de áreas" y en su dominio de influencia, a su vez, el sentimiento generalizado es que las teorías de la complejidad y el caos pueden dialogar con las humanidades con más fluidez y naturalidad de lo que ha sido nunca el caso en la tensa interface entre las ciencias blandas y las duras (Hayles 1993; Kiel y Elliott 1997: 3; Emmeche 1998: 165-174; Thrift 1999: 32; Lewin 1999: ix; Capra 2003: 22). Pero aunque la "nueva alianza" entre posmodernismo y teorías de la complejidad recién se está afianzando, hay quienes predicen que a la larga estos nuevos paradigmas acabarán suplantando incluso a sus compañeros de ruta ocasionales en el favor académico y en el mercado (Argyros 1991: 7; Riebling 1993; Turner 1997; Byrne 1998: 179; Urribarri 2003). Ninguno de los marcos complejos genuinos (desde la cibernética hasta la teoría del caos) es en su origen inherentemente posmoderno, anticartesiano, anticientífico ni nada parecido; esa es una de las precisiones que habrá que establecer y demostrar en este texto.

Mientras el tumulto arrecia, las corrientes se diversifican y las posturas de casi todos los enclaves se radicalizan ya sea a favor o en contra, lo concreto es que las teorías y los algoritmos de la complejidad aún no han entrado de lleno en el repertorio conceptual de las ciencias sociales en general, ni en el de la antropología en particular. Son, todavía, una especialización de nicho, aunque sus adeptos crean que lo que piensan ellos es lo que debería pensar todo el mundo. A despecho de su arrogancia eventual , los usos de la complejidad en las ciencias blandas son todavía titubeantes, sus prácticas inciertas y sus logros modestos.

Se han propuesto varias explicaciones de este virtual *impasse*. Alan Sokal y Jean Bricmont han afirmado en *Imposturas Intelectuales* (1999) que algunos pensadores que presumen familiaridad con formas avanzadas de la teoría de la complejidad (incluyendo fractales, caos y sistemas alejados del equilibrio) han interpretado con excesiva laxitud el sentido de los conceptos técnicos y no han satisfecho requisitos de consistencia lógica, coherencia semántica y rigor pragmático que en otras ciencias se saben ineludibles. Aunque la alegación de impostura es un argumento demasiado categórico y no falta el antropólogo que acuse de frivolidad a esos críticos (Mier 2002: 103), es palpable que la producción científica en el espacio de innovación compulsiva de la posmodernidad ha sido pródiga en proclamas de fuerte tenor retórico, en las que se habla de la complejidad en términos grandilocuentes y se trata a las epistemologías rivales con una sorna y una soberbia que no parecen respaldadas por ningún logro. En pocos lugares se encuentra el tesoro de resultados que debería ser fruto de esos presuntos progresos en materia teórica; cuando aparece no sólo es decepcionante sino (y éste es ahora el pecado mayor) desoladoramente simplista, aún en los términos de sus propias reglas de juego.

Esta situación se presenta incluso en obras ambiciosas de autores de primera línea como Georges Balandier (1988) o Edgar Morin (1999), así como en los modelos de segundo orden de los constructivistas, cuyas radicalidades buscan ser todavía más extremas que las de los posmodernos (Watzlawick 1994; Watzlawick y otros 1988; Maturana 1996; Ibáñez 1990). Éstos culminan en una proclama salpicada de unos pocos tecnicismos interpretados más allá de toda garantía, para terminar negando la existencia objetiva de la realidad en nombre de unos pretextos que no dan para tanto. Renuncian a elaborar modelos productivos desde los cuales abordarla, o repiten consignas que hace veinte años sonaban agudas pero

han dejado de serlo a fuerza de reiterarse. ¿Cuantas veces más se puede anunciar que el reduccionismo, el *logos* y la representación están en crisis? ¿Quién puede seguir creyendo que con un poco de reflexividad se suple la falta de ideas instrumentales, o que es mejor una deconstrucción cualquiera que una buena heurística positiva? Además, las interpretaciones entre pueriles y extravagantes de la teoría del caos, los sistemas dinámicos, la autoorganización, el efecto mariposa, el principio de irreversibilidad, la mecánica cuántica, el teorema de Gödel y los atractores extraños en las humanidades ya son innumerables, al punto que han engendrado un género específico de desmentidos, una galería grotesca de "usos y abusos", y un movimiento multitudinario de reacción (Phelan s/f; Sussmann y Zahler 1978; Pagels 1982; Bouveresse 1984; Kadanoff 1986; Zolo 1990; Winner 1993; Ruelle 1990, 1994; Gross y Levitt 1994; Stenger 1995; Bricmont 1996; Gross, Levitt y Lewis 1996; Back 1997; Eve 1997; Koertge 1998; Spurrett 1999a).

También existe una desproporción importante en la calidad y rendimiento demostrados por las diversas teorías de la complejidad en su ambiente de origen, así como en su nivel de generalidad y estilos de enunciación. Algunas formulaciones habitan un espacio tan abstracto y enrarecido que sería milagroso que se las pudiera bajar a tierra así como están para integrarlas a nuestros conceptos y problemas. Mientras casi no existe una extrapolación antropológica satisfactoria de la idea de estructuras disipativas, de la teoría general de sistemas, de la antropología de la complejidad de Morin o de la teoría de catástrofes, la expansión de la Internet ha ido de la mano de cientos de trabajos, docenas de asociaciones virtuales o reales, revistas periódicas, congresos especializados y un número asombroso de piezas de software razonablemente productivas, aunque de valor dispar, en forma de autómatas celulares, redes booleanas, algoritmos genéticos, agentes y fractales, elaboradas por empresas, científicos, aficionados entusiastas o equipos de trabajo en universidades técnicas y humanísticas: AScape, Brazil, Calab, Chaoscope, Chaos for Java, ChaosPro, DDLab, Dyna32, Dynamic Solver, Fractint, FractMus, HarFA, IAtoChaos, IFSDesign, IFS Toolkit, Life32, LSystem4, LS Sketch Book, Manpwin, Moduleco, NetLogo, Mirek's Cellebration, Repast, StarLogo, Swarm, Tiera-Zon, UltraFractal, Visions Of Chaos, Winfract… Y el punto es que los científicos sociales están empezando a usarlas y a tomarles el gusto, o lo harán pronto.

Una vez más la dualidad es explicable. No todas las entidades a revisarse aquí son del mismo orden arquitectónico. Las teorías totalizadoras proporcionan entidades que en informática se llaman "especificaciones" globales y genéricas, mientras que los algoritmos están a un paso de ser "implementaciones" circunscriptas; y eso marca una diferencia. Aquéllas encarnan proyectos en gran escala; éstos implican realizaciones puntuales. Las implementaciones se materializan en herramientas; las especificaciones no necesariamente. Muchos han percibido esta dicotomía, observando que por un lado hay grandes construcciones filosóficas sin demasiado sustento experimental (como la teoría de Prigogine, o la teoría de la complejidad de Morin) y por el otro un grupo que ha logrado resultados prácticos contundentes, pero que es poco proclive a la teorización, sólo le concede interés "en la medida en que ilumine la práctica" o es tal vez presa de "un profundo pánico epistemológico" (Bateson y Bateson 1989: 28; Holland 1992b: 2; Hayles 1993: 30; Edens 2001). Es por ello que este libro estará dividido en dos: por un lado las grandes teorías, por el otro los conjuntos algorítmicos. Aquéllas a su vez estarán vigorosamente seccionadas entre las que entiendo que valen la pena y las que no.

Aunque en principio se intuyen buenas posibilidades de instrumentación de los algoritmos, y aunque hay unos cuantos trabajos bien resueltos en publicaciones y *proceedings* de congresos especializados, lo que hoy se encuentra mayormente en la práctica de las ciencias sociales es un conjunto de intentos programáticos que no ha logrado cubrir la brecha entre una formulación matemática que es para muchos impenetrable y un régimen de significado que algunos desean mantener sin cambios, aunque sus vocabularios sean nuevos. A veces daría la impresión que no se trata de aventurarse en un paradigma distinto, o incorporar ideas novedosas, sino que el juego consiste en ensayar otras formas de decir lo mismo, o en encontrar un punto de negociación entre posiciones antagónicas, pero tradicionales: cientificismo y estudios culturales, positivismo y hermenéutica, sistémica procesualista y post-procesualismo (Bentley y Maschner 2003: 4).

Subsiste además una tenaz resistencia al modelado computacional, como si los métodos de la complejidad se pudieran llevar adelante con lápiz y papel, o a golpes de intuición y retórica (Mikulecky 1995: 7; Horgan 1996). Y también suele ser equívoca la tipificación de los modelos, leyéndose con frecuencia que es lo mismo caos que catástrofe, red neuronal que red semántica, programación evolutiva que darwinismo neuronal, algoritmo genético que memética, complejidad que azar, o topología que geometría fractal. Si bien muchos de esos modelos están relacionados entre sí de maneras diversas (cf. Abraham 2002), cada uno de ellos aporta enfoques distintivos que convendrá esclarecer y sistematizar.

Eso no será fácil. El campo está sucio; las posiciones son vehementes, sesgadas, agonísticas. Ni hablar de los mitos y dogmas que han surgido; o de los conceptos científicos ficticios, como los *hiperespacios de reflexión variable* o la *escisiparidad fractal* de Baudrillard (1992: 156-160); o de las presunciones erradas, como la exigencia de un gran número de variables como atributo necesario de la complejidad, o el requerimiento de igualdad de tamaño entre las cosas complejas y su modelado (Chaitin 1975; 1987; Cilliers 1998: 3, 24); o de las fusiones incontroladas entre los significados técnicos y los vulgares, como cuando se llega a afirmar que "la concentración de la teoría del caos en las cualidades no lineales de la naturaleza se ha descripto mediante términos como curvatura, fluidez, complejidad y atracción: todas características que se atribuyen al concepto occidental de femineidad" (Morse 1995: 14). Como en ningún otro campo, aquí prosperan discursos que expiden veredictos sin juicio previo y dictan cátedra sobre ciencias a las que no conocen, fundándose en presunciones indiciales de lo que deberían ser. En este libro podré documentar algo de toda esta portentosa mixtificación, pero su magnitud es demasiado vasta como para poder abarcarla, e insistir en ella crearía un efecto de distracción que sería injusto para con muchas ideas de verdadero valor. Algo habrá que hacer al respecto, sin embargo, porque esas distorsiones han impuesto una imagen inexacta del nuevo paradigma, imagen que podría hacerlo triunfar o fracasar por las razones equivocadas.

En fin, hay de todo. Con el objetivo de proporcionar una fundamentación razonablemente sólida de los métodos para abordar los fenómenos complejos en este libro se revisarán en detalle los desarrollos teóricos más representativos ligados a la complejidad, con énfasis en la literatura técnica reciente. A fin de definir un foco más acotado, se excluirán las investigaciones en torno de la complejidad desorganizada (vale decir, los modelos estadísticos) con las únicas excepciones de la teoría de la información y las redes neuronales, y más por el uso de aquélla como componente de otros marcos y por la relación de éstas con comportamientos emergentes que por sus estructuras particulares.

También se dejarán al margen escenarios empíricos de mera simplicidad sobreabundante, susceptibles de abordarse con técnicas de análisis multivariado o *clustering*, según es práctica común en los estudios de la llamada complejidad social o cultural. Tampoco se tratarán el análisis de redes sociales, las redes de Petri, la dinámica poliédrica o la complejidad social entendida en el sentido estadístico-computacional de Kolmogorov-Chaitin (p. ej. Butts 2001). La superabundancia de variables en la complejidad sociocultural y de ligaduras en las redes sociales remite a modelos mecánicos (abigarrados o de gran envergadura, pero no complejos), tal como la palabra "análisis" lo indica. Pues si una cosa quedará clara es que el paradigma de la complejidad, como quiera que se lo interprete, proscribe, circunscribe o redefine el análisis, y que esa no es una pequeña redefinición.

También deben excluirse las investigaciones que se ocupan de la cibercultura, los hipertextos, las comunidades virtuales, los cyborgs post-orgánicos, la crítica sociológica o cultural de la tecnología o de sus prácticas, el imaginario tecnocientífico, la lectura esquizo-analítica del ciberespacio y temas semejantes, por más que en ocasiones sus especialistas sientan que están realizando una importante antropología de la complejidad contemporánea (Escobar 1994; Haraway 1995; Marcus 1996; Helmreich 2001). Todo ese campo es un desprendimiento de los estudios culturales intrínsecamente anecdótico, y en lo que a mí concierne está bien que lo siga siendo. Este libro se supone que es sobre teoría y métodos, y no hay mucho de eso por allí.

Las últimas exclusiones de monta afectarán, inesperadamente, al azar, a la incertidumbre, a las matemáticas y lógicas difusas de Lotfi Zadeh (1965) y al pensamiento borroso de Bart Kosko (1995), que guardan relación más con probabilidades estadísticas y con las problemáticas de la inducción, la inexactitud, la polivalencia o los rangos continuos, que con los factores sistémicos de complejidad que aquí ocupan el centro de la escena. También quedan fuera de consideración las elaboraciones en torno a conjuntos rudos, vinculados con la inexactitud, la vaguedad o la fragmentariedad en el análisis y minería de datos. Estos conjuntos fueron elaborados por Zdzisław Pawlak de la Universidad Tecnológica de Varsovia hacia 1980, y a pesar de las consonancias de sus nombres y la proximidad de sus motivaciones, no coinciden por entero ni con la matemática difusa de Zadeh, ni con la lógica polivalente de Łukasiewicz (Pawlak 1982). Todo esto es sugestivo y enriquecedor, pero colateral.

El libro que sigue no es entonces sobre cualquier complejidad, desorden o anarquía sino estrictamente sobre *complejidad organizada*, lo cual involucra sistemas dinámicos, emergentes, aperiódicos, refractarios a la reducción, no lineales, así como las herramientas y formalismos concomitantes. Variante por variante, se discutirá críticamente la posibilidad de aplicar los modelos matemáticos complejos o sus arquitecturas conceptuales a la realidad empírica de la que se ocupa nuestra disciplina; se investigará en qué medida algunos de ellos podrían servir para inducir límites a la arbitrariedad de la descripción, para visualizar la estructura de los problemas, o al menos para promover ideas, tanto correctoras como creativas. Cuando así fuere (y es de prever que no siempre resulte de ese modo) se acompañará el tratamiento de los asuntos teóricos con referencias a modelos informáticos o conceptuales que llevo realizando desde hace varios años, aplicados a diferentes casos, y con el registro de las exploraciones de los nuevos formalismos que han hecho otros antropólogos y científicos sociales antes que yo.

En la literatura del género, el que se está leyendo ha de ser un texto heterodoxo, pues si bien el autor conoce las argumentaciones en torno de la complejidad desde hace un tiempo y está

habituado a sus herramientas, no necesariamente comparte sus estrategias de militancia, ni la prescripción que estipula que el paradigma de la complejidad es imperativo para todo contexto y objeto de investigación, ni la premisa de que es excluyente o espontáneamente superior a otras epistemologías esenciales (mecánicas o estadísticas), de las que urge aquí admitir sus rigores e identificar las condiciones de su eventual oportunidad. Si alguien necesita entonces una refutación de Galileo, Newton, Descartes o Laplace deberá buscar en otro lado; la mayor parte de lo que aquí llamo el paradigma discursivo de la complejidad está febrilmente consagrada a ese evangelio.

Mi convicción es que el aporte de las teorías de la complejidad, liberado de una escoria que no es poca, involucra menos un renunciamiento a lo que antes se tenía que una renovación estratégica, una oportunidad para trascender la propensión mecanicista y nomológica que muchos (me incluyo) tenemos incorporada como la forma natural de pensar. No sé si verdaderamente se encontrará al final del camino una práctica científica de otro carácter, iconológica en vez de argumentativa, multidimensional en vez de reductora, como se ha llegado a ambicionar (Harvey y Reed 1997; Wolfram 2002). Aunque esa pretensión parece exorbitante, hacia esas coordenadas se orienta la idea.

Las ciencias del caos y la complejidad proporcionan un marco denso y sugestivo para comprender posibilidades y límites metodológicos con una claridad como pocas veces se ha dado. Esa es la idea dominante de este libro, aunque para llegar a ese punto haya que dar un amplio rodeo para familiarizarnos con un campo en el que se originan muchas de las preguntas para las que las nuevas ciencias son la respuesta, al cabo de un larguísimo compás de espera. Este desvío recorre una historia que esporádicamente aporta buenas moralejas, pero que en general sería mejor que no se repitiese, pues ya se ha reiterado muchas veces. El tratamiento de la ciencia de la complejidad y el caos comienza entonces recién en el tercer capítulo; lo que le precede es rudimento, contexto, prehistoria. Pero no siempre lo más nuevo es superior. A veces sucede, sobre todo cuando aparecen implicadas ciertas figuras particulares (Turing, Wiener, Ashby, Shannon, Ulam, von Neumann, Darwin, Chomsky, incluso Bateson), que algunas de las intuiciones de mejor calidad resultan ser también las más tempranas.

Dado que, por definición, suele escabullirse tanto desorden en torno de la complejidad, y debido a que el simbolismo de sus expresiones sistemáticas discurre a tanta distancia de los razonamientos difusos a los que las humanidades se han acostumbrado, se hará por último hincapié en la adecuada comprensión epistemológica de los modelos. Esto obedece a que en la mayor parte de la literatura antropológica o bien se les suele asignar una misión explicativa que en general no les cabe (como si de modelos mecánicos convencionales se tratase), o se los entiende en función de lo que se quiere que digan, o se los usa para redituar un hallazgo para el cual el sentido común habría sido suficiente. Por eso éste será un texto crítico pero también pedagógico, una combinación rara de manual de referencia y de manifiesto de una posición que en el fondo es tanto epistemológica como política, pues una proporción significativa de las ciencias aquí implicadas está imbuida de ideologías que conviene deslindar, la propia inclusive. En el molde de una narrativa que aspira a ser legible, intentaré destilar un material de orden práctico que sirva para articular seminarios instrumentales de nivel avanzado en antropología sociocultural y arqueología de la complejidad. Cuando este texto exprese lo que tiene que decir, se espera que los lectores dispongan de una caracteri-

zación razonablemente precisa de los modelos, de una ponderación fundamentada de su posible valor, y de las orientaciones técnicas indispensables para su implementación.

No existe una sola perspectiva sobre la interpretación exacta de las ciencias de la complejidad y el caos; no hay un canon monológico al que se atenga todo el mundo. A menudo se encuentra que autores habitualmente confiables promueven ideas particulares que distan de lo que considero exacto: que el caos requiere numerosidad, que los sistemas con ruido no pueden ser propiamente caóticos, que la complejidad está ligada al azar, que los sistemas dinámicos no lineales no son ergódicos, que hay componentes cuánticos en el caos, que los sistemas complejos deben ser abiertos, etcétera. Quien más, quien menos, todos incurren en uno de esos deslices alguna vez, sobre todo cuando se alejan de sus dominios primarios de conocimiento o cuando dejan prevalecer intereses de escuela. En las decisiones que he tomado para arbitrar estos casos no me he dejado llevar por el prestigio de quien formula dichas alegaciones, sino que he escogido la alternativa que disfruta de las demostraciones formales más contundentes, la que refleja el consenso de los especialistas y la que me dicta mi propia experiencia, en ese orden de prioridad. La construcción que aquí presento como *las* ciencias de la complejidad y el caos es entonces un artefacto que podría haberse construido de otras maneras, pero que aquí he procurado que se rija por estos criterios.

Este texto no habría satisfecho mi propio umbral de satisfacción de no haber sido por las sugerencias de quienes accedieron a su revisión técnica (Alberto Rex González, Hugo Scolnik y Pedro Hecht), los intercambios de ideas con alumnos y colegas de seminarios de posgrado y conferencias sobre complejidad en México, Colombia, Japón y Argentina, y los aportes de Ron Eglash, Nicolás Kicillof, Diego González, Juan Barceló, Rafael Pérez-Taylor y Alan Sokal. También ha sido esencial el trabajo de los miembros y colegas de mi equipo de investigación de la Universidad de Buenos Aires, y en particular Damián Castro, Diego Díaz, Sergio Guerrero, Eduardo Jezierski y Jorge Miceli, siempre dispuestos a desarrollar programas de redes neuronales, autómatas celulares y algoritmos genéticos conforme a mis extraños requerimientos. De más está decir que soy el único responsable de las imperfecciones que hayan subsistido.

Dejo para el final una última advertencia, que es todo lo contrario de una evasiva. Estamos en guerra. En el terreno de las teorías de la complejidad todos los textos son momentos dialógicos de una contienda, y es por ello que son tan intensos. Como tantos otros, este libro se escribe desde una posición tomada, que en este caso deberé admitir que es clásicamente científica. Es la que ha producido los fundamentos teóricos, los algoritmos y los recursos computacionales concretos, pero puede que no sea en estos tiempos la más popular en el plano mediático. También se escribe desde una postura que sigue creyendo que hay una realidad allí afuera, que esa realidad puede y debe ser cambiada, y que las distinciones entre izquierda y derecha, materialismo y subjetivismo, ciencia y anticiencia ni remotamente han perdido su importancia, por más que algunas corrientes postulen otras prioridades. Aunque el combate por desbrozar estos paradigmas de la intromisión posmoderna y constructivista pueda parecer perdido, haré el esfuerzo para que quienes pretenden pasar por buenos sin serlo encuentren, si alguien más es sensible a ciertas evidencias, un poco de la resistencia que se merecen.

2. Las grandes teorías de sistemas complejos

Tal vez sea un resabio de alguna indigestión de lecturas estructuralistas, o el efecto de la práctica y la enseñanza del análisis componencial, con sus grillas ortogonales y sus taxonomías discretas. Lo concreto es que no puedo resistir al impulso de elaborar algo así como una tabla periódica de las formas teóricas y de los tipos algorítmicos que constituyen las estrategias que se han propuesto a propósito de la complejidad. Pienso también que esta marcación del campo puede proporcionar un principio de orden, lo que no viene mal en una corporación que se ha dejado regir en demasía por la naturaleza caótica de su objeto. Este principio será administrado en términos que reconozco laxos, pues no urge que aquí se desarrolle una axiomatización del asunto; el sentido aproximado de palabras tales como "teoría", "modelo" o "paradigma" deberá deducirse entonces del contexto.

La primera serie de marcos teóricos que habrá de revisarse tiene que ver con los paradigmas globales de la complejidad. Por lo común se manifiestan como colecciones más o menos heterogéneas de principios genéricos aglutinados en cada caso en torno a un conjunto relativamente pequeño de ideas-fuerza. En orden casi cronológico las ideas dominantes serían: los mecanismos de control y los circuitos de realimentación en la cibernética, el concepto de sistemas abiertos en la teoría general de sistemas, los sistemas alejados del equilibrio, las estructuras disipativas (y posteriormente la auto-organización y la autopoiesis) en la cibernética tardía, los principios de estabilidad estructural y morfogénesis en la teoría de catástrofes, la dinámica no lineal en la teoría del caos y luego todo eso junto, más o menos armonizado, por piezas enteras o en fragmentos, en el paradigma integral de la complejidad.

Mientras que la primera parte del libro estará consagrada a esos marcos abarcativos, la segunda tendrá que ver más bien con una serie de algoritmos, más concentrados en su foco, que permiten modelar procesos emergentes, con amplios espacios de fase y con comportamientos que desbordan la intuición. Por lo común, estos formalismos se constituyen en familias que responden a un mismo principio constructivo: la iteración o recursión de una función muy simple, que resulta en capacidades robustas de resolución de problemas o modelado de procesos arbitrariamente complejos. Ese principio algorítmico incluye a los autómatas celulares, las redes booleanas aleatorias, la subclase de los algoritmos evolutivos (programación evolutiva, estrategia evolutiva, algoritmo genético) y finalmente la geometría fractal. Al lado de esos formalismos iterativos hay otros tipos algorítmicos y unas cuantas criaturas matemáticas características, tales como la ecuación logística, los algoritmos conexionistas, las metaheurísticas de enjambre y las distribuciones de ley de potencia.

Las grandes teorías, articuladas como formas amplias y envolventes, y los conjuntos algorítmicos, con un núcleo tecnológico más acotado, se desarrollan aproximadamente en paralelo desde la década de 1940 a la actualidad. Ocasionalmente, algunas de aquéllas implementan algunos de éstos como herramientas: la ecosistémica reciente ha reemplazado la teoría de la información por los algoritmos genéticos y adaptativos; las versiones tardías de la cibernética de segundo orden muestran preferencia por los autómatas celulares y los modelos conexionistas; las nuevas teorías de la complejidad y el caos se inclinan hacia los fractales y las distribuciones de la criticalidad auto-organizada. La tendencia dominante de las teorías mayores es hacia la agregación de ideas que tienen una cierta unidad de propósito, que a veces desembocan en formalizaciones locales y teoremas que fundamentan ar-

gumentos específicos de sus esquemas conceptuales. Las piezas enunciativas que constituyen estas teorías no han decantado como cuerpos formales continuos y exhaustivos que puedan aplicarse orgánicamente a algún conjunto de escenarios empíricos (cf. Edens 2001; Abraham 2002; Bunge 2004). No hay entonces *teorías* de la complejidad totalizadoras, ni siquiera una, aunque las seguiré llamando así en aras de la simplificación.

Mientras las grandes teorías fueron elaboradas por mentalidades generalistas con visión panorámica, los algoritmos han sido obra de técnicos. En este campo, por otra parte, la tendencia pareciera ser más bien a la disgregación en modalidades especializadas, a veces en conflicto recíproco. La historia de todos los algoritmos conocidos exhibe, con curiosa constancia, este fenómeno cismático peculiar. Cada uno de ellos se ha ido escindiendo en una colección de variantes, algunas de ellas complementarias y otras excluyentes; en el conexionismo, por ejemplo, pueden distinguirse perceptrones, adalines, redes de Hopfield, máquinas de Boltzmann, perceptrones de capas múltiples, redes amo-esclavo, filtros de Gabor, etcétera, repartidos en tres epistemologías cognitivas distintas; los sistemas complejos adaptativos se diferencian en autómatas celulares uni o bidimensionales, deterministas o indeterministas, redes booleanas, modelos basados en agentes, vida artificial y una familia entera de técnicas de programación evolutiva. Algunas variantes son formas más versátiles o abstractas de otros tipos, o combinaciones de ellos. Cada tipo, además, se puede amalgamar con variantes de otras clases algorítmicas, lo que genera un repertorio amplísimo de posibilidades de articulación. Todo esto se revisará más adelante, con la paciencia que haga falta.

Se examinarán a partir de ahora las formas mayores de las teorías de la complejidad, especificando antes la tabla de los principios epistemológicos más generales que establece los principios comunes a todo el conjunto, así como un componente estadístico (la teoría de la información) que se encuentra embebido, explícita o implícitamente, en todas las teorías a tratar.

2.1 – Tipificación epistemológica: Los cuatro modelos

Las teorías de sistemas constituyen un conjunto de propuestas que ha merecido una recepción variada e inconcluyente por parte de las ciencias duras y blandas. No es mi objetivo sintetizar esas teorías en todos sus aspectos, por cuanto sería preciso necesario recorrer numerosas formulaciones, algunas de ellas de carácter muy especializado. El estudio presentado en este capítulo pretende ser sólo una introducción a un campo enredado y polémico, sobre el cual los científicos y epistemólogos no han dicho todavía la última palabra. Esa introducción tampoco ha de ser homogénea y neutra, dado que la pregunta esencial que aquí se plantea concierne a la relevancia de estos marcos para la ciencia social en general y la antropología en particular. Se interrogarán entonces las teorías conforme a su valor para estas ciencias, lo cual implica un tamiz y una visión sesgada.

Las teorías de sistemas giran en torno de una clase peculiar de modelos; por ello, antes que nada, deberemos describir los tipos de modelos susceptibles de construirse en una ciencia empírica. La que revisaremos no es más que una de las tipologías posibles, pues se pueden postular tantas taxonomías como criterios de articulación se escojan. La pregunta que corresponde hacerse es cuántas clases de modelos hay.

Todo el mundo conoce la existencia de *modelos mecánicos* (en los que se procura analizar y explicar los mecanismos, factores o procesos que producen determinado estado de cosas) y

los *modelos estadísticos* (en los que se inducen regularidades o correlaciones entre diversas series de fenómenos). Si hablamos de modelos en un sentido laxo, atinente a la forma abstracta esencial de las formulaciones teóricas, la antropología abunda en ambas clases de modelos; casi todas las teorías que se han propuesto encarnan alguno de esos tipos, aunque a menudo resultaría forzado inscribir ciertos ejemplares de teorización antropológica bajo uno u otro. Aunque la suma de los modelos mecánicos y los estadísticos no agote las formas imaginables de investigación empírica, es evidente que sus estructuras son antinómicas y que cubren gran parte del espacio de posibilidades de una teoría.

Ahora bien ¿qué quiere decir que un modelo sea mecánico o estadístico? La tipología de la cual disponemos se halla alborotada. Ante todo, conviene olvidarse de las definiciones ancestrales de Claude Lévi-Strauss, puesto que son incorrectas. Dice Lévi-Strauss:

> Una última distinción se refiere a la escala del modelo, en comparación con la escala de los fenómenos. Un modelo cuyos elementos constitutivos se encuentran a la misma escala que los fenómenos será llamado 'modelo mecánico', y 'modelo estadístico' aquel cuyos elementos se encuentran a una escala diferente (Lévi-Strauss 1973 [1952]: 255).

Aunque muchos creen que Lévi-Strauss inventó esa tipificación, sus definiciones se fundan en una lectura muy ligera de la bibliografía de divulgación de las ciencias duras (sus referencias aluden a Norbert Wiener), más que en un razonamiento sistemático propio. Si hubiera reflexionado sobre lo que escribió el cibernético Ross Ashby, tal vez no habría incurrido en el sofisma que señalaré más adelante. Pues se preguntaba éste:

> Al aludir a "tamaño" nos referimos a la complejidad del sistema. Pero, ¿qué significa esto? Si el sistema dinámico que nos interesara fuera una familia indígena de cinco personas ¿consideraríamos que está constituido por cinco partes, y que por lo tanto es simple, o que está formado por 10^{25} átomos y que por lo tanto es muy complejo? (Ashby 1972: 90).

También en la nueva ciencia de la complejidad se sabe que no existe una escala "natural". Un planeta orbitando en torno a una estrella configura un sistema simple; ambos cuerpos contienen a su vez muchos sistemas complejos. "Este ejemplo ilustra la posibilidad de que un sistema colectivo tenga una escala diferente que la de sus partes. En la escala pequeña el sistema se puede comportar de manera compleja, pero en la escala mayor todos los detalles complejos pueden no ser relevantes" (Bar-Yam 1997: 5). Como decía Bateson (1985: 482), no todo el territorio pasa al mapa.

El sofisma levi-straussiano es doble, por cuanto luego establece que los dos tipos de modelos se aplican naturalmente, como el guante a la mano, a otros tantos tipos de sociedades, reputadas frías y calientes, o de tipo "reloj" y "máquina de vapor" (Lévi-Strauss 1969: 27-37). Pero ni los modelos son como aduce, ni casan con objetos predeterminados. En lugar de decir que los modelos mecánicos son los que están a la misma escala del fenómeno y los estadísticos a una escala (según se mire) más reducida o más amplia, diremos que los primeros establecen razonamientos que explican lo que sucede y los segundos identifican tendencias, asociaciones, adhesiones, correlaciones, concomitancias (Back 1997). Una y otra clase de modelos se imponen además diferentes clases de objetivos.

Dado que los modelos son entidades conceptuales (y no maquetas icónicas), ellos no pueden ser ni más ni menos simples que "los fenómenos", ya que desde el comienzo son otra cosa. Un modelo es una construcción lógica y lingüística, y a menos que se suscriba una teoría del lenguaje puramente nomenclatoria (el lenguaje como espejo de la realidad) no

puede existir isomorfismo ni correspondencia estructural entre enunciados y cosas. La escala de un modelo respecto de lo real es indecidible, ya que la realidad puede ser infinitamente descompuesta, es analíticamente inagotable: una ameba puede llegar a ser tan complicada como un sistema planetario; el sol y la tierra, con ser inmensos y albergar tantas cosas, constituyen un sistema "pequeño", pues astronómicamente tienen sólo doce grados de libertad. No hay entonces una escala propia de los fenómenos: teorías que tratan de enormes conjuntos sociales son a menudo más simples que teorías que abordan la personalidad de sujetos individuales. No hay tampoco modelo que incluya todos los aspectos de un fenómeno: las manzanas pueden ser objeto de estudios económicos, botánicos, nutricionales, transgénicos, geométricos, bíblicos, de gravitación… La caracterización de los tipos de modelos debe fundarse en otras consideraciones.

- Un modelo mecánico no involucra reducir los sujetos o las culturas a máquinas, ni adherir a metáforas mecanicistas, ni hablar siquiera de modelos en el sentido más formal de la palabra. Serían mecánicos, por ejemplo, los modelos desplegados por Marvin Harris en sus estudios de casos, en los que se buscan identificar los factores que determinan ciertas prácticas culturales. Algunos de los modelos de la ciencia cognitiva son asimismo mecánicos, pues describen la estructura interna de las operaciones o dispositivos que causan estados de la mente o que explican las regularidades de la cognición. Dado que los modelos mecánicos engendran explicaciones de casos a partir de principios generales, la estructura de las inferencias en estos modelos es deductiva: una explicación *subsume*, aún cuando identifique mecanismos particulares. Las leyes propias de los modelos mecánicos, si las hubiere, tienden a ser deterministas, y el objetivo de los modelos es habitualmente la explicación de hechos en función de principios actuantes. "La cuestión central de una explicación científica es la propuesta de un mecanismo", dice Maturana (1995: 65) y por una vez estoy de acuerdo con él. Siempre que aparezca la palabra "porque" estamos, desde Marshall Sahlins a Marvin Harris, en presencia de uno de estos modelos. No todos los modelos mecánicos son reduccionistas, en el sentido de requerir descomposición y análisis de las entidades que los componen; la ley de gravitación universal descubierta por Newton, $F = K\ m\ m'/r^2$, por ejemplo, es una explicación estructural que no requiere ahondar en la estructura íntima de la materia subyacente (Thom 1985: 16). Pero en general análisis y explicación van juntos; aquél adquiere sentido cuando ésta se alcanza. En ciencia cognitiva el modelo mecánico canónico es el sistema experto, un sistema que deduce conclusiones (o prueba hipótesis) aplicando hechos y reglas.
- Son estadísticos, en cambio, los estudios de la antropología comparativa o transcultural derivada de George Murdock, en los que se busca establecer la probabilidad de ocurrencia de una práctica en presencia de determinada institución, o a la inversa. Se trata de una modalidad de estudio correlacional, por lo común cuantitativa, que no arriesga hipótesis sobre la naturaleza precisa de los mecanismos y relaciones causales; es por eso que los modelos estadísticos se conforman al llamado esquema de la caja negra. En ellos interesa determinar qué condiciones (o estímulos) producen determinadas conductas (o respuestas), sin que importe deslindar por qué. Algunas veces los modelos estadísticos se conciben como acercamientos preliminares, propios de una ciencia que aún no puede imponer leyes a su objeto. Dado que estos modelos consideran varios casos individuales y abstraen de ellos generalizaciones y regularidades, la estructura de la inferencia en estos modelos es inductiva (Holland y otros 1989). En general los modelos

estadísticos abundan en tipologías, de las cuales se derivan las entidades o categorías culturales a ser correlacionadas. Las leyes típicas de los modelos estadísticos, cuando las hay, son necesariamente probabilistas. Son estadísticas las leyes de Zipf, Pareto, Weber-Fechner y Gutenberg-Richter: generalizan los casos conocidos, sin explicar nada; se mantendrán en pie hasta que las excepciones sean estadísticamente significativas. No todos los modelos estadísticos son cuantitativos; no lo es su variedad más conspicua en ciencias humanas, el conductismo. En ciencia cognitiva el modelo estadístico por excelencia se encarna en las redes neuronales.

Aunque podría parecer a priori imposible, existe una alternativa a los modelos mecanicistas y estadísticos, una especie de paradigma básico, un arquetipo de articulación teórica. Se trata de los modelos *sistémicos*, que en ocasiones han ejercido influencia en la antropología debido a su énfasis en los fenómenos dinámicos, en los universos totales abiertos a su entorno, en los procesos complejos y en las interacciones fuertes. Los modelos de esta clase se piensan o bien como de estructura diferente a la de las formas clásicas, o como la superación de éstas en una secuencia epistemológica de carácter evolutivo.

Por razones bastante complicadas y de todas maneras contingentes, han habido cuatro grandes formulaciones sucesivas de estas teorías de sistemas, que son:

(1) La *cibernética*, propuesta por Norbert Wiener hacia 1942.

(2) La *teoría general de sistemas* (o teoría de los sistemas generales), desarrollada por Ludwig von Bertalanffy hacia la misma época, pero difundida mayormente entre 1950 y 1970.

(3) La *teoría de las estructuras disipativas* (o de los Sistemas Alejados del Equilibrio) promovida por el Premio Nobel Ilya Prigogine desde principios de la década de 1960, y continuada por la cibernética de segundo orden de Heinz von Foerster, la cibernética conversacional de Gordon Pask, la autopoiesis de Humberto Maturana, la enacción y la neurofenomenología de Francisco Varela y el constructivismo de Ernst von Glasersfeld.

(4) La *teoría de catástrofes* de René Thom, elaborada hacia 1970.

El creador de la distinción entre modelos mecánicos, estadísticos y sistémicos (o complejos) fue sin duda Warren Weaver (1948). En general, los modelos mecánicos se adaptan a sistemas o procesos de complicación relativamente escasa, que se prestan a ser íntegramente analizados. En otras palabras, los modelos mecánicos conciernen a los mecanismos que producen determinado estado de cosas, y estos mecanismos resultan a la vez explicativos cuando el objeto es comprensible en el juego de la simplicidad organizada. La simplicidad es aquí un efecto teórico, una distinción epistemológica, no una cualidad empírica: un objeto simple se aviene a ser explicado mediante una analítica que distingue en él o bien un solo nivel de organización, o bien relaciones lineales entre diversos niveles.

Los modelos estadísticos, por su parte, se ocupan de fenómenos que (desde una determinada perspectiva) resultan demasiado complejos para ser analizados y que sólo son susceptibles de un abordaje sintético-inductivo; al no ser íntegramente cognoscibles o analizables, podría decirse que los objetos del estudio estadístico están desorganizados. Los mecanismos que producen los fenómenos no son conocidos, o se reputan imposibles de conocer, o no se los estima relevantes, y es por ello que se los remite a una caja negra.

Los modelos sistémicos, finalmente, procuran organizar la complejidad a través de un conjunto de ecuaciones que describen los diferentes aspectos de los sistemas. El objeto canónico de las teorías sistémicas son los llamados *sistemas complejos*, que, como luego se verá, no por ello son desorganizados, pues, por su complejidad particular, poseen la capacidad de auto-organizarse. Aunque no todas las teorías sistémicas cumplimentan esta salvedad, hagámosla aquí: la complejidad no es en sentido estricto un atributo ontológico propio del fenómeno que se estudia, sino una escala inherente al punto de vista que se adopta y a los conceptos que se usan, en especial conceptos relacionales tales como el de interacción, organización y emergencia. Por consiguiente, tanto un microorganismo como el universo son por igual susceptibles de abordarse como sistemas complejos. Una misma realidad empírica, diferentemente mapeada sobre una teoría, puede ser objeto de cualquiera de los tres tipos de modelos expuestos.

El siguiente cuadro presenta, diagramáticamente, las características de los tres principales tipos de modelos; me he tomado la libertad de añadir a la tabla canónica de Warren Weaver (1948) y Anatol Rapoport y William Horvath (1959), como cuarta instancia, las propuestas interpretativas (también podríamos poner en su lugar las posmodernas y las constructivistas), pues, aunque la historia nunca acostumbra contarse de esta manera, vienen como anillo al dedo para completar la tabla periódica de las estrategias posibles. Las teorías fenomenológicas, simbólicas e interpretativas en general, en efecto, tienden a inhibir las generalizaciones en nombre de un conocimiento local que ni siquiera permite una comprensión totalizadora de los casos individuales, y que confía más en la conjetura o en la corazonada (generosamente llamada "abducción") que en el razonamiento formal[1]. En el mismo espíritu, y partiendo de la base que una teoría podría considerarse como un modelo sumado a una interpretación, yo diría que nuestros cuatro modelos mapean bastante bien con los cuatro tipos teóricos propuestos por Penrose: los mecánicos serían predominantes en las teorías que él llama "supremas", los estadísticos en las que denomina "útiles", los sistémicos en las "provisionales" y los hermenéuticos en las "descaminadas" (Penrose 1996: 185-190).

Modelo	Perspectiva del Objeto	Inferencia	Propósito
Mecánico	Simplicidad organizada	Analítica-deductiva	Explicación
Estadístico	Complejidad desorganizada	Sintética-inductiva	Correlación
Sistémico	Complejidad organizada	Holista-descriptiva	Descripción estructural o procesual
Interpretativo	Simplicidad desorganizada	Estética-abductiva	Comprensión

Tabla 2.1 - Los cuatro modelos

Nótese que los modelos sistémicos no se conforman al modelo nomológico deductivo, dado que su concepción en torno a la equifinalidad, multifinalidad, multicausalidad, causalidad circular o realimentación, no-linealidad y la elección de transiciones de fases, procesos de morfogénesis y emergencia como objetos de estudio, les impide expresar las aserciones lineales de condicionalidad que constituyen las estructuras típicas de los sistemas deductivos. En un estudio sistémico, lo más que puede hacerse es describir formalmente el fenómeno de

[1] No pretendo defender aquí el tratamiento de los modelos interpretativos, fenomenológicos y posmodernos en estos términos, ni hace falta tampoco que lo haga; a fin de cuentas, han sido los promotores de las corrientes humanísticas y los intelectuales genéricos de ese círculo los que han reclamado para sí el privilegio de una epistemología separada (Lyotard 1986; Geertz 1996; Vattimo 1997).

que se trate (sea la estructura del sistema, sea su trayectoria) a través de ecuaciones. Estas acostumbran ser ecuaciones diferenciales o ecuaciones de diferencia no lineales, aunque otras expresiones matemáticas podrían aplicarse a la misma descripción. A menudo un sistema se describe mediante un grafo topológico, una red o un diagrama de flujo, asociado o no a una caracterización matemática más precisa. A partir de la descripción se podrá, facultativamente, construir un modelo de simulación, manipularlo, descubrir propiedades, proponer hipótesis y derivar predicciones respecto de su comportamiento.

Es importante señalar que los tres modelos primarios no constituyen una jerarquía. Los sistémicos no son en modo alguno "mejores" que los estadísticos o que los mecánicos; estos últimos no sólo se sostienen como en sus mejores días para abordar una mayoría abrumadora de problemáticas (que los aviones vuelen, que se construya una computadora, que se formule un diagnóstico en un sistema experto, que se prediga la trayectoria de un planeta, que se elicite el sistema fonológico de una lengua), sino que son, más allá de sus dificultades y límites, los únicos que poseen una base axiomática amplia y consensuada, por más que el mundo parezca tornarse menos mecánico cada día que pasa.

Existen además procedimientos de transformación que permiten convertir un tipo en otro. Cuando un modelo mecánico opera iteraciones, se obtiene otra clase de entidad mecánica que incorpora variables de tiempo y a la que se puede agregar un elemento de azar: este es el caso de los mecanismos que operan como cadenas de Markov, camino estocástico, agregación limitada por difusión, movimiento browniano. Pero cuando en un modelo estadístico de caja negra se adiciona tiempo y se desarrollan iteraciones, pasamos a tener un modelo cibernético y comportamientos emergentes; por eso es que Bertalanffy describe la entrada de su esquema de retroalimentación como "estímulo" y la salida como "respuesta" (Bertalanffy 1976: 43). Un modelo sistémico característico, los autómatas celulares, consisten en un conjunto de elementos cada uno de los cuales opera como un modelo mecánico. Algunos modelos pueden ser reducidos a otros: la termodinámica fue, de hecho, reducida exitosamente a lo que hoy se conoce como mecánica estadística (Nagel 1981).

También son posibles incrustaciones y complementariedades de formas modélicas diferentes, como cuando se agrega un principio (estadístico) de lógica difusa a un formalismo (sistémico) de redes neuronales o autómatas celulares, o a un sistema experto (mecánico) de inteligencia artificial. Hay además teorías que podrían encajar en dos modelos diferentes, conforme al énfasis que se quiera imponer: el funcionalismo, por ejemplo, se puede entender como un modelo mecánico con la causalidad a la inversa (las instituciones sirven *para* preservar el equilibrio) o como un modelo sistémico en condición de estabilidad. En ciencia cognitiva hay algunos modelos mixtos, a mitad de camino entre el análisis simbólico y la síntesis de capacidades, y es por ello que se los llama de *caja gris*. Cuestiones de esta naturaleza serán aludidas en el texto pero no tratadas en detalle, ya que no es éste un tratado de epistemología sobre los tipos de modelos posibles, sino una caracterización de una variedad de ellos, en el sentido wittgensteiniano: un conjunto politético, aglutinado en función de un aire de familia.

Aprovecho esta semblanza para cuestionar un par de creencias muy difundidas: creencias que afirman, por ejemplo, que cualquier modelo más o menos formalizado califica como modelo sistémico, o que las teorías sistémicas equivalen sencillamente a modelos matemáticos o computacionales de cualquier clase (o viceversa). Existen, de hecho, numerosos modelos formales o axiomáticos que son más bien mecánicos o estadísticos, así como existen

modelos sistémicos no cuantitativos. La inteligencia artificial simbólica es claramente mecánica, las redes neuronales son estadísticas, y la teoría de catástrofes es sistémica, pero ésta carece de implementación computacional y cuantificación. Las computadoras, empero, serán un requerimiento categórico en los algoritmos de la dinámica no lineal.

Tampoco es verdad que la teoría de sistemas sea una concepción positivista, rótulo con el que de un tiempo a esta parte se quiere reprimir toda propuesta con alguna aspiración de rigor. La teoría de sistemas *no* es positivista; los positivistas (desde los furtivos hasta los ultras) rechazan muchas de sus manifestaciones (Bunge 1956; 2004: 62-63; Berlinski 1976). Los postulados sistémicos, de Bertalanffy a Prigogine, constituyen reacciones contra el principio positivista de la analiticidad y contra la reducción de toda ciencia a la mecánica, aunque la ciencia compleja actual es más prudente y menos dogmática sobre el particular (Hatcher y Tofts 2004). Los sistemas a secas constituyen un concepto indefinido, desgastado por el abuso; pero los sistemas generales, alejados del equilibrio o complejos son algo preciso y circunscripto. Tampoco es suficiente hablar de sistemas para que la teoría que uno promueve sea sistémica: los sistemas de la sistémica son de una especie peculiar que los autores caracterizan de modos convergentes. Es conveniente entonces restringir el concepto de teoría sistémica a las construcciones conceptuales que compartan los rasgos precisos que, en relación con cada marco teórico, se definirán a partir de ahora.

2.2 – El fundamento común de las teorías de sistemas: Teoría de la Información

El concepto de información es parte esencial de la mayor parte de las teorías sistémicas, desde la cibernética hasta los algoritmos genéticos, pasando por la antropología de Bateson, en la que juega un rol decisivo. La teoría de la información en sí misma no es de carácter sistémico sino estadístico, y como tal se la ha usado como marco teórico autónomo y suficiente en diversas ramas de las ciencias sociales. Como habrá de verse en los capítulos subsiguientes, el concepto de información definido por esa teoría es una referencia inevitable de la mayor parte de las estrategias que guardan alguna relación con la complejidad.

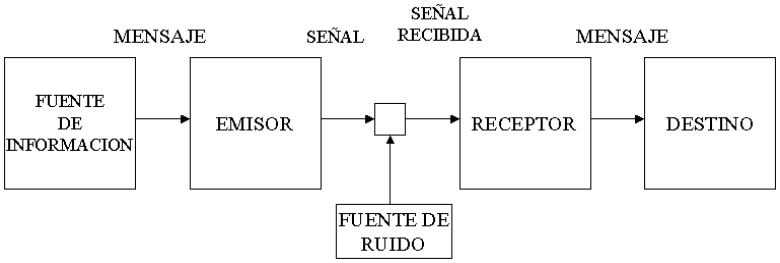


Fig. 2.1 - Esquema de la Comunicación

La información es una dimensión cuantificable comprendida en el circuito de la comunicación. El origen del llamado esquema de la comunicación (fig. 2.1) es incierto y de autor anónimo; tampoco puede determinarse en qué disciplina o marco teórico se comenzó a hablar de él. Se fue cristalizando y enriqueciendo con el correr de los años, y ya hay testimonio de él en las primeras décadas del siglo, por ejemplo en el *Curso de Lingüística General* de Ferdinand de Saussure. Ciencias o subciencias enteras (la teoría de la comunicación de masas, la sociolingüística, la pragmática) giran de un modo u otro en torno suyo.

En el modelo comunicacional clásico se considera que, en un contexto dado, el emisor transmite al receptor una serie de señales articuladas según un código, formando mensajes que circulan por un canal afectado por más o menos ruido, ambigüedad o interferencia. Di-

versos autores han agregado más y más elementos al esquema, subdividiendo sus componentes en otros más precisos y restringidos, pero el cuadro básico, el más consensuado, discurre aproximadamente como se muestra en el diagrama. Este esquema básico de la comunicación forma parte de numerosas teorías; Roman Jakobson, por ejemplo, formuló entre 1956 y 1960 su clasificación de las funciones del lenguaje mapeándolas sobre los diferentes elementos del modelo: la función conativa o imperativa es la que enfatiza al receptor, la función referencial gira en torno del contexto, la emotiva destaca al emisor, la fática constata la disponibilidad del canal, la metalingüística se centra en el código, y la función poética hace hincapié en el mensaje (Jakobson 1984: 353).

Referida a ese mismo conjunto originario, la teoría de la información o teoría matemática de la comunicación, formulada por Claude Shannon en 1948, es una teoría relacionada con el cálculo de probabilidades que relaciona las propiedades del canal de comunicación con el código que rige la generación, transmisión y decodificación de las señales que componen un mensaje (Shannon 1948; Shannon y Weaver 1949). Hoy se habla de ingeniería de la comunicación para referirse a este dominio, aunque las ecuaciones fundamentales que definen y miden la cantidad de información siguen siendo las establecidas por Shannon.

Urge aclarar que la teoría de la información nada tiene que ver con el significado de los mensajes: se trata de un abordaje que analiza cosas tales como las formas más óptimas de codificación, la cantidad de redundancia que hay que introducir para compensar el ruido, y, en especial, la "medida de la información". Esta cantidad de información se define como la cantidad de incertidumbre de un mensaje en función de la probabilidad de aparición de los elementos que componen el código. No hay en general ninguna correlación entre la riqueza de significaciones y la complejidad informacional, aunque algunos teóricos de la cultura y la sociedad (Abraham Moles, Max Bense, los semiólogos de la Escuela de Tartu) hayan creído lo contrario. El concepto de información, asimismo, es físico y no psicológico: una sinfonía informacionalmente compleja no alberga, subjetivamente hablando, demasiada improbabilidad o sorpresa para quien la conozca de memoria (aunque objetivamente haya sido más difícil de memorizar que una sinfonía más simple o más breve).

La información (que en homenaje a Ralph Hartley se simboliza con la letra *H*, no con *I*) es un concepto muy simple: información es la medida de los *grados de libertad* que existen en una situación dada para escoger entre señales, símbolos, mensajes o pautas. El conjunto de todas las categorías (el "alfabeto", cualquiera sea el modo de la comunicación) se denomina también *repertorio*. La cantidad de información se mide como el logaritmo binario del número de patrones alternativos, formas, organizaciones o mensajes que forman ese repertorio. La unidad en que se expresa la medida de la información es también la más simple de todas: el *bit* o dígito binario [*b*inary dig*it*]. La complejidad creciente de las pautas informacionales determina apenas un crecimiento logarítmico en las unidades de medida: dos alternativas elegibles (dos grados de libertad) requieren un solo bit, cuyos valores pueden ser sólo 1 y 0; cuatro alternativas se expresan con dos bits (00, 01, 10, 11); ocho con tres bits (000, 001, 010, 011, 100, 110, 111, 101), y así sucesivamente. La ecuación que describe la información, como medida del sentido del orden de un mensaje es:

$$H = -(p_1 \log_2 p_1 + \ldots + p_n \log_2 p_n)$$

donde los mensajes posibles tienen probabilidades $p_1, \ldots, p_n$. La misma unidad y la misma ecuación se utilizan sea cual fuere la naturaleza de las cosas comunicadas: sonidos en un sistema fonológico, fonemas en una secuencia de palabras, palabras en una secuencia de

frases, frases en una secuencia de discurso, discursos en una secuencia de conductas lingüísticas (o bien notas en un motivo musical, motivos musicales en la sección de una pieza, secciones en un movimiento, movimientos en una pieza). La información mide, por definición, el grado de organización de un sistema.

Cuanto más previsible es un elemento, menos información trasunta: el final de las palabras en un telegrama o en taquigrafía, por ejemplo (-ilidad, -ción, -ismo, -ante, -mente, -ible), puede llegar a ser tan previsible (redundante) que en algunos casos es posible omitirlas. Cuanto más ruido o interferencia hay en un canal y cuanto más incierta sea la aparición de un elemento, mayor será la necesidad de redundancia para garantizar una decodificación correcta. Un sistema fonológico que incluya muchos sonidos parecidos de aparición incierta será más informativo (tendrá una medida de información más grande) que otro sistema con menos sonidos y de sucesión previsible. Al mismo tiempo, podría decirse que cuanto más rico sea el alfabeto o repertorio de un sistema, tanto más improbable será la aparición de un signo particular: la información es también la medida de la elección y la improbabilidad.

La idea de que la teoría de la información es lineal como el telégrafo y la cibernética es compleja como una interacción "orquestal", propuesta por Yves Winkin (1976), no es del todo exacta, pues la teoría de la información no es autónoma y está más o menos explícitamente integrada en todas las teorías sistémicas. La teoría de la información es un ingrediente de todas ellas, en tanto y en cuanto lo que fluye por el interior y hacia o desde el exterior de los sistemas sólo puede ser de tres órdenes: materia, energía o información.

Información	Entropía
Señal	Ruido
Exactitud	Error
Regularidad	Azar
Forma pautada	Falta de forma
Orden	Desorden
Organización	Desorganización
Definición	Indefinición

Tabla 2.2 – Información y entropía

Se ha encontrado, además, que la energía guarda una relación conceptual muy estrecha con la información. Para ciertos autores (aunque no para otros, como se verá), el desorden, la desorganización, la falta de estructura o la aleatoriedad de la organización de un sistema se concibe como su *entropía*, un concepto acuñado por Rudolf Clausius hacia 1865. Las leyes de la termodinámica aseguran que el universo tiende hacia un estado de máxima entropía. Desde el punto de vista de las ecuaciones que las describen, la entropía es exactamente lo inverso de la información, según lo estableció Leo Szilard en 1929; por consiguiente, Leon Brillouin ha propuesto llamar a esta última *negentropía* o "entropía negativa" (Singh 1979: 90). Para esta línea de pensamiento, las características de la información y de la entropía (tanto las propiedades técnicas como las que les atribuye el sentido común) son siempre inversas. El cuadro de sus contrastes es el que se ilustra en la tabla 2.2.

Dada la relación entre información y entropía, así como el carácter contraintuitivo que tiene el hecho de que orden e improbabilidad sean equivalentes (o que los sistemas con mayor entropía y por ende "complejidad" sean los que se encuentran en estado de equilibrio), la bibliografía se distribuye en partes iguales entre quienes conciben información y entropía como antónimos (Atlan, Boltzmann, Brillouin, Denbigh y Denbigh, Forsé, Miller, Szilard,

Wicken) y los que equiparan ambas categorías (Ashby, Lévi-Strauss, Shannon, Singh, Wilson). Michael Fischer (2002), por ejemplo, define repetidamente la entropía como "una medida de orden en un sistema de estructuras", y Paul Cilliers (1998: 8) asegura que "la cantidad de información en un mensaje es igual a su entropía"; pero James Grier Miller (1978: 13) está persuadido que entropía es más bien desorden y desorganización. No todos los autores han advertido que no existe acuerdo sobre este particular.

Como bien señaló Katherine Hayles en el mejor capítulo de su libro, existen dos tradiciones intelectuales que distintivamente oponen o identifican ambos conceptos: una se remonta a Warren Weaver, el colaborador de Claude Shannon, y la otra a Leon Brillouin; para la primera postura la información se vincula con el desorden y la incertidumbre, para la segunda con el orden y la organización (Wilson 1968; Hayles 1993: 53-86). Se comenta que la decisión de Shannon de llamar entropía a la información le vino de un consejo de John von Neumann, quien le sugirió que usara la palabra porque "nadie sabe qué es la entropía; entonces, en un debate, usted siempre tendrá ventaja" (Denbigh y Denbigh 1985: 104)[2]. En una palabra, se sabe perfectamente cómo hacer la medición, pero no existe el menor consenso en cuanto a connotaciones y valores no triviales de lo que se está midiendo: ¿es probabilidad o incertidumbre? ¿orden o desorganización? Un mensaje bien organizado ¿es más o es menos informativo? Convendrá que el lector tenga en cuenta que existen dos formas contrapuestas de interpretar el sentido de la información, ya que cuando se formulen las teorías del caos y la complejidad esta discordancia seguirá dividiendo las aguas[3]. En las humanidades hay una división todavía más drástica entre quienes consideran central el concepto de información (Bateson, el primer Watzlawick) y quienes lo estiman irrelevante o engañoso (Rosen, Maturana, Varela, Morin, Capra).

Ignorando siempre estas antinomias, el uso de la teoría de la información como marco articulador de investigaciones socioculturales ha sido común, sobre todo en la década de 1960 y principios de la siguiente. La Escuela semiótica de Tartu, en Estonia, con ramificaciones en Moscú, fue un equivalente soviético de la antropología cultural; las elaboraciones teóricas de esta escuela, por lo menos en sus años iniciales, se basaban a menudo en esa teoría. Nadie menos que Andrei Kolmogorov (1968) propuso en ese contexto una medida para determinar el carácter más o menos poético de un texto. En la llamada Escuela de Stuttgart, Max Bense (1972) aplicó la teoría a la percepción de fenómenos artísticos, desde la pintura

---

[2] Conjeturo que la anécdota es apócrifa, o que su estructura implementa un patrón que induce a plagiarla y aplicarla a otros acontecimientos. Lo mismo se afirma que le aconsejó Shannon a Wiener respecto de la palabra "cibernética" (http://www.asc-cybernetics.org/foundations/definitions.htm).

[3] Quienes elaboraron la teoría de la información saben de estos nudos filosóficos. Cuando se trata de definir, por ejemplo, la probabilidad como frecuencia de resultados en experimentos de azar, es difícil evitar las definiciones circulares. Si se dice que la frecuencia de un resultado específico del revoleo de una moneda es de 0.5 (entendiendo que la frecuencia es la fracción promedio de "caras" en largas secuencias) hay que definir entonces el significado de "promedio" sin usar una palabra que sea sinónimo de probabilidad (MacKay 2003: 26). Nada de esto es fácil ni intuitivo. Otra forma muy común de concebir la probabilidad es en términos de creencias o supuestos: la probabilidad de que las obras de Shakespeare hayan sido escritas por Bacon, o de que una firma sea auténtica; éste es el punto de vista subjetivo o bayesiano. Esta concepción satisface la intuición, pero no todos los matemáticos la encuentran aceptable.

hasta la música, pretendiendo formular una estética objetiva que redujera el margen de subjetividad; en Francia Abraham Moles desarrolló una especie de sociología semi-formal a la que llamó *Sociodinámica de la Cultura* (1978). El antropólogo simbolista Benjamin Colby, a su vez, ha sugerido que existe analogía entre la organización entendida informacionalmente y la redundancia en los patrones culturales. Él considera que hay aspectos de la cultura fuertemente pautados (y por ende, redundantes), mientras que otros están más expuestos al cambio y son por eso más proclives a la desorganización. En cierto modo, los mitos y los rituales proporcionan orden y forma a aquellas regiones de la actividad y el pensamiento humano que de no ser por ello resultarían las más desordenadas y enigmáticas (Colby 1977). Hasta hace unas décadas los libros de Bense y de Moles acostumbraban traducirse al castellano y diseños de investigación como el de Colby eran comunes. Con el correr de los años esta variedad de sociología y estética informacional dijo todo lo que tenía que decir (lo que ya nadie recuerda muy bien qué era) y se precipitó en un camino de rendimiento decreciente. Pueden encontrarse abundantes ejemplos de uso de la teoría informacional en antropología, psicología y otras ciencias humanas en la compilación de Alfred G. Smith *Comunicación y Cultura* (1976-77).

Hoy nadie se ocupa de esos menesteres en estos términos. Casi todo el mundo cree que las apropiaciones de la teoría de la información por parte de las humanidades ha resultado un proyecto fallido. Lo reconoció el propio padre de la teoría general de sistemas, Ludwig von Bertalanffy: "La teoría de la información, tan desarrollada matemáticamente, resultó un chasco [¿fiasco?] en psicología y sociología", y sus contribuciones se limitan a aplicaciones bastante triviales (1976: 22, 103). Aunque el juicio es bastante lapidario, es fuerza admitir que algún grado de razón lo asiste, por más que la confusión se origine en otra parte. También Robert Rosen opina que "nunca se ha descubierto la utilidad de conceptos como los de entropía, información, negentropía u otros semejantes para caracterizar la organización" (1980: 364). Como habrá de verse más adelante, será la teoría sistémica del caos (y no la teoría estadística de la información) la que proporcione métricas de distribución y magnitudes constantes susceptibles de aplicarse a hechos de la cultura, la evolución y la historia: el número de Feigenbaum-Collet-Tresser, la dimensión fractal, la criticalidad auto-organizada, la distribución de ley de potencia. Se podrá abordar con ellas desde la música hasta los patrones de asentamiento arqueológicos, desde los motivos del arte hasta la secuencia de los procesos históricos, para establecer (según su uso y propósito) ya sea los valores idiosincráticos de un estilo o caso, o sus aspectos universales.

Más allá de sus dilemas semánticos o sus opositores ideológicos, la teoría de la información sigue siendo tan válida como siempre y es fundamental en áreas de la teoría y de la práctica que uno ni siquiera imagina o que se dan por sentadas (cf. MacKay 2003); pero a su lado existen conceptos y algoritmos que satisfacen elaboraciones más expresivas y de más alto nivel. Aunque alguna vez se la consideró autosuficiente y definitoria, la medida de la información sólo da cuenta del valor de una variable en algún lugar del circuito. Edgar Morin lo consideraría un concepto-problema, antes que un concepto-solución, y no una noción terminal sino un punto de partida (Morin 1974: 280-281). Yo no creo que sea un problema; es un factor que es mensurable cuando circula linealmente por un canal; un factor que, cuando se desvinculó de la idea de significado a la que el sentido común se empeña en asociarlo, dio lugar a una teoría que hizo posibles a todas las restantes. La teoría de la información debía sin embargo embeberse en y articularse con otros cuadros teóricos para resultar de interés conceptual y utilidad pragmática. Eso fue, de hecho, lo que sucedió.

2.3 – Cibernética

La cibernética es una formulación que se conoce también como "teoría de los mecanismos de control"; como se dijo, fue propuesta por Norbert Wiener hacia 1942 y bautizada así en 1947, aunque existe un antecedente allá por la década de 1920, ligada al nombre de un tal Richard Wagner, de Munich. "Cibernética" deriva (al igual que el vocablo "gobierno") de la palabra griega *χυβερνήτης* que significa "timonel", y el término se refiere a los mecanismos o técnicas de control en general. La palabra se encuentra por primera vez en el *Gorgias* de Platón. En el vocabulario científico la expresión "cibernética" ya había sido usada en 1834 por André-Marie Ampère en su sistema de clasificación de las ciencias con el significado de "ciencia del gobierno".

La cibernética forma parte de un campo de formulaciones teóricas de muy distinta naturaleza que se ocuparon de sistemas complejos, y que hicieron extensivas sus exploraciones sobre las características de dichos sistemas a otras disciplinas. En este sentido, existen dudas sobre la prioridad intelectual de Wiener o de von Bertalanffy en el terreno de las teorías sistémicas; Bertalanffy parecía bastante preocupado en demostrar que a él la idea se le había ocurrido primero, a mediados de la década de 1930, pero que recién tuvo oportunidad de difundirla varios años más tarde; de todas maneras, afirmaba, los sistemas cibernéticos son sólo un caso especial, aunque importante, de la clase de los sistemas que exhiben autorregulación (Bertalanffy 1976: 16; 1982: 110, 141).

2.3.1 – Mecanismos de control y retroalimentación

El esquema cibernético es, entre todos los modelos sistémicos, el que se relaciona más estrechamente con la teoría de la información, que ya he caracterizado en el apartado anterior. Pero la cibernética es algo más que un conjunto de ecuaciones que miden flujos de información. Wiener concibió la cibernética poco después de la Segunda Guerra, en relación con el control y corrección del tiro de los cañones antiaéreos. La pregunta para la cual la cibernética fue la respuesta es ésta: ¿Cómo debe fluir la información en un mecanismo de tiro para que éste sea eficaz? Antes de Wiener los ingenieros ya habían trabajado con mecanismos de corrección pero eran básicamente circuitos eléctricos ad hoc; la novedad de Wiener fue introducir el concepto de información. Disparar al azar (el método *aleatorio*) no había demostrado ser muy práctico; combinar el azar con un proceso selectivo (el método *estocástico*) tampoco daba buenos resultados. Dado que los aviones vuelan a gran velocidad, es preciso predecir la posición futura del aparato a partir de sus posiciones anteriores y, eventualmente, de la evaluación del margen de error de los tiros fallados. El mecanismo de puntería del cañón requiere de un procedimiento o circuito de información que vaya acercando los disparos hasta abatir el avión, reduciendo paulatinamente la magnitud del error con oscilaciones cada vez más estrechas. Este circuito de información devuelve al mecanismo elementos de juicio acerca de los resultados de su propia conducta. Teleológica o no, la circuitería cibernética no se construye poniendo antes que nada las causas, sino privilegiando los propósitos.

El principio que rige el funcionamiento de esos circuitos es lo que Wiener llamó retroacción, retroalimentación o *feedback*. En estos procesos, la información sobre las acciones en curso nutren a su vez al sistema, lo realimentan, permitiéndole perfeccionar un comportamiento orientado a un fin. Sucede como si, en cierta forma, los efectos pasaran a formar

parte de las causas. Algunos llaman a ésto bucles o circuitos de causalidad circular, diferenciándolos de los procesos de causalidad lineal.

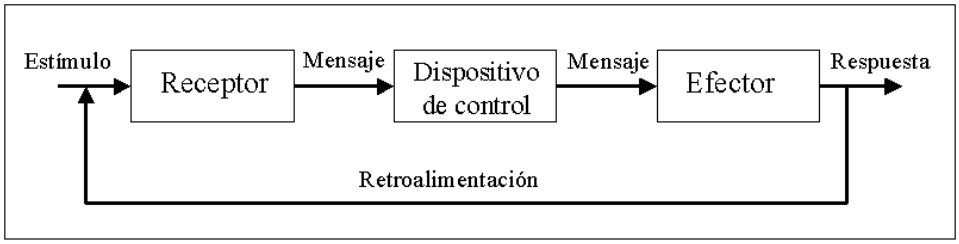


Fig. 2.2 - Retroalimentación

Entre paréntesis, digamos que no hay que llamarse a engaño por la participación de Wiener en un proyecto militar. Su investigación se aplicó de hecho a una demanda defensiva. Wiener fue lo que los norteamericanos llaman un liberal y los europeos un intelectual comprometido y progresista. Luchó contra el belicismo (incluso negándose a rubricar contratos universitarios con las fuerzas armadas), combatió al complejo industrial-militar norteamericano y mantuvo posturas afines al pacifismo y al ecologismo contemporáneos. Wiener se hizo conocer como antinazi y antiestalinista, aunque subrayaba que no era anticomunista, lo que en esos años era por lo menos arriesgado; luchó contra la caza de brujas iniciada por el senador McCarthy, apoyando a víctimas de la persecución como su amigo Dirk Struik, un notable intelectual y matemático marxista. Según Ron Eglash (s/f), Wiener fue un pionero legendario al cual los soñadores y utópicos recurrieron más tarde, en la década de 1960, un momento particularmente romántico y transgresor.

Hay que aclarar que Wiener no inventó el *feedback* sino que lo integró en una teoría general de los circuitos o mecanismos de control mecánicos, biológicos, psicológicos o sociales, a la que llamó cibernética, la cual tiene poco que ver con el uso que se otorga a veces a la palabra para designar a la informática, a la biónica o a los robots. Su contribución a la ciencia no radica en la invención del concepto, sino en su colocación en el lugar central de una disciplina genérica de formidables valores aplicativos. El creador de la idea de *feedback* fue probablemente Harold Black, tan temprano como en 1927.

Wiener encontró que los mismos principios que rigen el ajuste óptimo de los dispositivos de tiro rigen el comportamiento orientado hacia metas propio de los organismos: el ejemplo característico es el de llevar un vaso de agua a la boca, corrigiendo las trayectorias mediante *feedback* para minimizar las oscilaciones. También es común en la bibliografía el ejemplo del termostato que regula la temperatura de un ambiente manteniéndola estable. James Lovelock señala que la capacidad humana de mantener la postura erecta, caminar y correr en terrenos accidentados, o la habilidad de sostenerse en pie en la cubierta de un barco que se balancea, denotan la acción de complejos mecanismos cibernéticos que, mediante eficaces flujos de información, comparan la intención con la realidad, detectan las divergencias e introducen las correcciones necesarias (Lovelock 1985: 63-64). De hecho, cualquier caso de regulación es oportuno, pues los mecanismos reguladores siempre son retroalimentantes. La cibernética no tenía en absoluto el propósito de concebir los humanos como si fueran máquinas, que es lo que alegan sus detractores; lo que pretendía era más bien indagar los mecanismos biológicos que ejecutan esas complejas funciones de control con una eficiencia tal que hasta la fecha apenas existen dispositivos artificiales comparables. En todas las teorías de sistemas la biología suministra el camino a seguir; cuando llegue el momento en que se

formulen las teorías de la complejidad, las capacidades de los seres vivos encarnarán también los modelos a tener en cuenta.

De inmediato se encontró que así como existía una modalidad de retroalimentación que reducía las desviaciones, existía otra (presente en determinados procesos o susceptible de simularse en mecanismos de amplificación) que era capaz de ampliarlas casi exponencialmente. Se llamó *feedback negativo* a la primera variante y *feedback positivo* a la segunda, y se definió matemáticamente a ambas. También se verificó que todos los fenómenos y mecanismos de retroalimentación (mecánicos, electrónicos, biológicos, ecológicos, psicológicos y sociales) obedecían a la misma caracterización formal. En otra palabras, se descubrió que la estructura de los procesos de causalidad circular era siempre la misma, independientemente de la naturaleza material del sistema en que estuvieran presentes.

Más allá del *feedback*, que a primera vista es su concepto más saliente para los lectores provenientes de las humanidades, la cibernética aborda cuestiones que, como luego se verá, encendieron la imaginación de algunos antropólogos y psicólogos de la época, y que hoy en día se perciben tanto o más relevantes en relación con las problemáticas de la complejidad. Por empezar, la cibernética ilustra con claridad cómo es que se delimita un sistema, proporcionando directivas que al mismo tiempo que están expuestas con simplicidad poseen un riguroso fundamento y permiten crear un conjunto de hipótesis de trabajo independientes del dominio de aplicación. También enseña que un sistema no es más que una nómina de variables; que cada sistema material contiene no menos que infinitas variables (y por lo tanto, de sistemas posibles); que incluso en una ciencia dura a veces es fácil y a veces difícil delimitar un sistema; que para que algo se pueda considerar un sistema debe constituir un conjunto de entidades que, con respecto a las variables consideradas, experimente lo que técnicamente se llaman transformaciones cerradas y uniformes; y que la definición de esas transformaciones es un procedimiento sencillo y fácil de aplicar (Ashby 1962: 61).

La cibernética también establece que su idea primaria es el concepto de cambio, ligado a la noción de diferencia; que para que un concepto semejante sea interesante debe extenderse al caso en que el factor (u operador) pueda actuar sobre más de un operando, provocando una transición característica en cada uno de ellos; que el conjunto de transiciones en un conjunto de operandos es una transformación (p. 23), y que no es necesario que las transformaciones sean numéricas para estar bien definidas (p. 43). Además la cibernética no es sino un marco, tal vez el primero de ellos, que se aviene inherentemente a estudiar la complejidad. El primer trabajo científico sobre complejidad se dice que ha sido "Science and Complexity" de Warren Weaver (1948), quien también acuñó el concepto de biología molecular. En función de otro concepto cardinal, el de isomorfismo, la cibernética define un espacio de conocimiento e investigación al que no interesa la naturaleza material de los mecanismos de control, pues se supone que las mismas formas algorítmicas caracterizan a todos los mecanismos, sean ellos físicos, biológicos o culturales.

Todavía hoy encuentro que los ejemplos del británico Ross Ashby respecto de sistemas, transformaciones y operandos, o sus caracterizaciones de la complejidad, constituyen una guía operativa y una invitación a pensar más rica y reveladora que, digamos, los estudios de Clifford Geertz sobre "La ideología como sistema cultural", o "El sentido común como sistema cultural". Cuando se vuelve a leer a Geertz a la luz de Ashby, se percibe que el antropólogo habría ganado órdenes de magnitud en su apreciación de dichos "sistemas" si se hubiera atenido a estas heurísticas. Y que habría tenido entre manos entidades mejor organiza-

das, para beneficio incluso de sus propios puntos de vista interpretativos. En los últimos capítulos del libro, cuando se traten las teorías del caos, se encontrarán lineamientos adicionales para definir un sistema, algunos de los cuales constituyen heurísticas insoslayables para cualquier disciplina que busque delimitar el objeto de sus modelos.

La cibernética relanzó asimismo la idea de comportamiento emergente, creada por George Henry Lewes en 1875: la idea establece que las características del todo no pueden deducirse a partir de las características de las partes. Esta circunstancia (que literalmente pone muy nerviosos a los epistemólogos de la línea dura nomológica-deductiva) se suele ilustrar mediante un ejemplo tan contundente como el de las propiedades del agua. El agua está formada, como se sabe, por hidrógeno y oxígeno; ambos elementos son combustibles; más aún, el oxígeno es esencial para la combustión misma. Sin embargo, el agua no es combustible en absoluto, y hasta se utiliza para apagar los fuegos. Ross Ashby aporta otras ilustraciones del mismo género:

(1) El amoníaco es un gas; también lo es el ácido clorhídrico. Al mezclar los dos gases el resultado es un sólido, propiedad que no posee ninguno de los reactivos.

(2) El carbono, el hidrógeno y el oxígeno son prácticamente insípidos; sin embargo el compuesto "azúcar" tiene un sabor característico que ninguno de ellos posee.

(3) Los veinte (más o menos) aminoácidos de una bacteria carecen de la propiedad de "autorreproducirse", aunque el conjunto, con algunas otras sustancias, posee esa propiedad (Ashby 1972: 155).

Los emergentes no se limitan a la química, ni requieren grandes cantidades de variables. El sociólogo George Herbert Mead usaba el ejemplo del agua en la década de 1930 (Mead 1932: 641). Pensando en el carácter no sumativo de los elementos de cualquier sistema con interacciones fuertes, escribe el sistémico Gerald Weinberg:

> Un psicólogo, por ejemplo, se alegraría si pudiera considerar únicamente pares de interacciones sumados. Esta simplificación significaría que para comprender el comportamiento de una familia de tres personas, se estudiaría el carácter del padre y la madre juntos, del padre y del hijo juntos y de la madre y el hijo juntos. Y cuando se reunieran los tres, su comportamiento podría predecirse sumando los comportamientos dos a dos. Por desgracia, la superposición de interacciones apareadas sólo da buenos resultados en la mecánica y en alguna otra ciencia (Weinberg 1984: 124).

La idea de emergente no autoriza a renegar de la causalidad, ya que aún cuando ciertas características terminales en una combinación (las llamadas "divergentes") no se pueden predecir, otras en cambio, las "convergentes", son predecibles. Ambas son, además, deterministas. Hidrógeno y oxígeno, en las proporciones y condiciones adecuadas, siempre dan agua. Del mismo modo, no se puede vaticinar por dónde pasarán las astilladuras de una grieta, pero sí se puede anticipar su patrón, por complicado que sea; y ese patrón no sólo es propio de las grietas, sino que es análogo al de otros fenómenos.

Gregory Bateson lo sabía muy bien. También sabía que, a diferencia de quienes remiten la familia, la cultura o la sociedad a un agregado de sujetos, la emergencia obliga a pensar en un registro más complejo que aquel en el cual se sitúan típicamente los individualistas metodológicos. En las puertas del siglo XXI, el concepto de emergente que se maneja en las ciencias de la complejidad enfatiza que las totalidades complejas se originan, no obstante, en principios y elementos muy simples (Bak 1996; Holland 1998; Lewin 1999: 213 y ss). Cuando examinemos los sistemas dinámicos adaptativos volveremos a tratar la cuestión.

Pese a la intención de Wiener de instaurar una disciplina horizontal, orientada a la problemática de los mecanismos de control y el flujo de información, semejante campo nunca se concretó. Se ha dicho que "la cibernética tenía más extensión que contenido" y que en las disciplinas menos formalizadas sus métodos se percibían engorrosos (Aspray 1993: 248). La cibernética "fue más un sueño que una teoría acabada, y resultó ser prematura" (Strogatz 2003: 40). Para Stephen Wolfram (1994: 496), la cibernética fracasó porque las matemáticas de la teoría de control llegaron a dominar sus textos, oscureciendo sus objetivos originales, que eran más genéricos. Cosma Shalizi (2002) lamenta que la cibernética haya suministrado un prefijo que parece indispensable a pensadores orientados al mercadeo y una fuente de inspiración para una sub-secta de contempladores del propio ombligo; aún así, bajo su bandera se ha hecho mucha buena ciencia, aunque no parece que las ideas cibernéticas puedan mantenerse unidas en un conjunto armónico.

Sin embargo, la iniciativa de Wiener fue capaz de definir una dirección general en las disciplinas científicas de la segunda posguerra, que comenzaron a prestar menos atención al movimiento, la fuerza, la energía y la potencia, poniendo mayor énfasis en la comunicación, la organización y el control. Diversas ciencias y tecnologías, con distintos vocabularios, orientarían esfuerzos en ese sentido, desarrollando en un grado inédito la ingeniería de las comunicaciones, los fundamentos matemáticos de los procesos informáticos, la teoría de autómatas, el estudio de patrones de auto-organización y las redes neuronales. Gran parte de lo que hoy existe en el campo de la dinámica no lineal, la complejidad y el caos se origina en esa inflexión o converge con ella en algún punto. Muchos estudiosos hoy en día se hacen llamar cibernéticos (Glasersfeld 1992; Halperin 1992; Pangaro 2000; Dimitrov y otros 2002); y están ciertamente orgullosos de serlo.

2.3.2 – Aplicaciones antropológicas

2.3.2.1 – Gregory Bateson y la esquismogénesis

El antropólogo que más directamente ha acusado el impacto de la cibernética ha sido sin duda Gregory Bateson, verdadero guru de la (contra)cultura californiana, nacido en Inglaterra en 1904 y fallecido en el Instituo Esalen de California en 1980. Este es el lugar para practicar una visión de conjunto de la obra batesoniana, la cual recibe cada día más atención fuera de la antropología a pesar de sus notables falencias, a revisar más adelante. Aclaro, sin embargo, que el pensamiento de Bateson no siempre coincide con ideas sistémicas estrictas. Su visión desborda a la sistémica; pero lo esencial de ella requiere alguna familiaridad con la cibernética, al menos, para comprenderse mejor.

En una época en que la cibernética era todavía una novedad indigesta entre los practicantes de las ciencias duras, Bateson aportó elementos de juicio antropológicos que hicieron a su consolidación y que la popularizaron incluso entre humanistas refractarios a las novedades. Sistémicos y cibernéticos de primera magnitud (Ross Ashby, Anatol Rapaport, el propio Wiener) lo citaban siempre con respeto en sus textos esenciales. En su bien conocida introducción a *Cybernetics*, Wiener refiere con insistencia que Bateson y Mead lo instaban a consagrar esfuerzos para desarrollar la cibernética en el dominio de los estudios económicos y sociales, en nombre de los problemas urgentes que se planteaban en esa "edad de confusión". Sin embargo, Wiener no compartía esas esperanzas, porque, a diferencia de lo que sucedía en el estudio de los gases, por ejemplo, la falta de datos estadísticos confiables, el

problema de escala y la vinculación fuerte entre el observador y lo observado serían fatales para la empresa. Escribía Wiener:

> Por mucho que simpatice con su actitud de urgencia ante la situación y por mucho que espere que ellos y otros competentes investigadores traten ese tipo de problemas, … no puedo compartir su opinión de que ese aspecto haya de ser para mí prioritario, ni su esperanza que sea posible lograr un progreso determinante en esa dirección capaz de lograr un efecto terapéutico en las actuales condiciones de nuestra sociedad. Para empezar, las grandes cifras que se barajan al estudiar la sociedad, no sólo son estadísticas, sino que las series estadísticas en que se basan son excesivamente limitadas. … [L]as ciencias humanas constituyen un mal campo de verificación de la técnica matemática. … Además, a falta de técnicas numéricas rutinarias razonablemente fiables, el elemento de juicio del experto que establece la evaluación de las entidades sociológicas, antropológicas y económicas es tan predominante, que no hay campo para el novel que haya quedado incólume a la experiencia del experto (Wiener 1985: 49-50).

Y agregaba más adelante:

> Algunos amigos míos … alimentan esperanzas notables, y falsas creo yo, … con respecto a la eficacia social de las nuevas formas de pensamiento que este libro [*Cybernetics*] pueda contener. … [C]onsideran que el cometido principal en un futuro inmediato es ampliar a los campos de la antropología, la sociedad y la economía los métodos de las ciencias naturales, con la esperanza de lograr un éxito equiparable en el campo social. Por creerlo necesario llegan a creerlo posible. En esto, insisto, muestran un optimismo desmedido y un desconocimiento de la naturaleza del progreso científico. … Es en las ciencias sociales en las que la interacción entre los fenómenos observados y el observador es sumamente difícil de minimizar. … Con todo mi respeto para la inteligencia, honradez de miras de mis amigos antropólogos, no puedo admitir que cualquier comunidad en las que han investigado ellos sea ya la misma después de la experiencia (pp. 213-214).

Pero aún ante la autorizada renuencia de Wiener, quien aconsejaba resignarse a mantener las ciencias sociales en el terreno del "método narrativo a-'científico'" (p. 215), Bateson (quizá por ser el principal entre los amigos antropólogos del maestro en el libro canónico de la nueva disciplina) se atrevió a extrapolar la idea, aunque no, en rigor, a emprender la formalización necesaria, o siquiera a intentar comprender sus requerimientos. Establecería así un patrón de uso de las teorías de la complejidad en el que las ciencias humanas, "conscientes de las dificultades con que se encuentran para producir modelos teóricamente satisfactorios" se mostrarían extremadamente bien dispuestas para tomar en consideración "cualquier cosa que los matemáticos pudieran proporcionarles" (Thom 1985: 52).

2.3.2.1.1 – Bateson y la heterodoxia creativa

Casi medio siglo antes de morir, Gregory Bateson había entrado ya en la historia de los intercambios disciplinarios con su *Naven* (1936). Este libro atípico e inclasificable es de por sí prometedor, pero en el momento de publicarse nadie podía imaginar lo que vendría después; con los años, Bateson habría de convertirse en una suerte de hombre renacentista de la antropología, un orfebre de las más amplias síntesis, obsesionado por la búsqueda de la pauta que conecta los mundos más diversos. Es necio querer mejorar el inventario que de esos mundos hicieron Levy y Rappaport, los responsables de su obituario:

> … evolución biológica, adaptación, ecología, arte, carrera de armamentos, organización social, comunicación, trasmisión cultural, aprendizaje, juego, fantasía, películas, carácter y

> personalidad, y, más generalmente, la naturaleza y las patologías del pensamiento y de la epistemología, de la cultura y de una clase variada de procesos integrativos que él supo llamar 'mente' (1982: 379).

Sería también arduo recorrer el acervo conceptual ofrendado por él a una antropología y a una psicología que estaban ya tan integradas desde su punto de vista, que rara vez sentía la necesidad de nombrarlas por separado, o de siquiera nombrarlas. Ya en *Naven* había impuesto nuevos matices al concepto de *ethos*, había reproducido vívidamente el proceso de cismogénesis (que explicaba por vez primera en términos dinámicos la gestación de dos o más *ethos* en el seno de cada sociedad), y había definido el alineamiento y la uniformización crítica de los mismos en la noción de *eidos*. Los autores que siguieron las pautas clásicas de Cultura y Personalidad después de difundidas las ideas de Bateson nos parecen ahora anacrónicos; el dinamismo del modelo presentado en *Naven* implicaba asimismo una ruptura respecto de la pauta epistemológica de los configuracionistas, cuyos sistemas, si en realidad eran tales, se comportaban más bien como estructuras estáticas, constitutivamente inapropiadas para el estudio del cambio.

Después de *Naven*, cuya trayectoria entre los antropólogos se aproximó al fracaso, cuyos atisbos precursores se juzgan mejor desde nuestros días y cuya debilidad etnográfica el mismo Bateson se apresuró a reconocer (1958: 278-279), la forja conceptual no se detuvo. La meticulosidad epistemológica de Bateson, más allá del desorden aparente y de la anarquía temática de sus ensayos, lo mantuvo lejos de todo reduccionismo y garantizó que sus encadenamientos categoriales tuvieran lugar *casi* siempre en el debido nivel de tipificación:

> La energía es igual a la masa por la velocidad al cuadrado, pero ningún especialista en ciencia de la conducta sostiene que la 'energía psíquica' tenga estas dimensiones. Es necesario, por consiguiente, revisar los elementos fundamentales para encontrar un conjunto de ideas con el cual podamos contrastar nuestras hipótesis heurísticas (1985: 22).

Incapaz de toda malignidad o infatuación, Bateson dejó escapar, en un acto de buena voluntad, el hecho de que ciertos estudiosos en las ciencias del comportamiento sí concebían la energía psíquica en esos términos fisicistas: no hay más que pensar en el concepto económico freudiano de sublimación, que describe el encauzamiento de un principio energético, en la idea jungiana de una energía no libidinal susceptible de cuantificarse, en el concepto topológico de los vectores de Kurt Lewin (cantidades dirigidas en un campo de fuerzas), en las leyes que gobiernan los flujos de la energía mental según Charles Spearman o en las digresiones energéticas del antropólogo Siegfried Nadel, que vuelan mucho más bajo que el resto de su obra.

Ya desde *Naven*, los estudios de Bateson no versan sobre un problema empírico (la cultura Iatmul, la esquizofrenia, la comunicación animal), sino sobre las posibilidades de estudiarlo y resolverlo, lo cual implica una instancia más epistemológica que analítica. Su mismo título lo revela sin ambages: *Naven: A survey of the problems suggested by a composite picture of the culture of a New Guinea tribe drawn from three points of view*. Bateson enseñó a los teóricos de ambas disciplinas el significado de la prueba de Gödel, de la abducción, de los procesos estocásticos, de los metalenguajes de Alfred Tarski y de los tipos lógicos de Bertrand Russell; después de él, ser trivialmente falaz se volvió un poco más difícil. Él mismo, sin embargo, se equivocó muchas veces, sentía pasión por enseñar cosas que no había aprendido muy bien y siempre mostró cierta ligereza adolescente en el tratamiento de cuestiones complejas, como si ahondar en ellas le resultara tedioso.

Igual que Alfred North Whitehead, Bateson urgía la necesidad de sortear toda "falacia de concretidad mal aplicada" (1985: 89); pero su creencia en la "unidad que traspasa todos los fenómenos del mundo" (p. 100) le impulsaba hacia adelante, sin que él mismo cuidara mucho que sus propias concretidades fueran aplicadas correctamente. Fue, en suma, un pensador reflexivo, siempre audaz y a veces riguroso, de esos que sólo se dan de tarde en tarde. Ya en la década de 1930 se animó a reformular la teoría de la cismogénesis mediante las ecuaciones empleadas por Richardson para describir las carreras armamentistas internacionales, proyectando hacia su transdisciplina, por primera vez, la teoría de los juegos. Dialogó con Ashby, con von Neumann y con Wiener en un plano entusiasta pero también crítico, adelantándose a lo que luego habría de ser la estrategia sistémica en antropología; traspuso a terminología cibernética todo lo que Freud encapsulaba bajo el concepto de "procesos primarios", sentando las bases para la lectura de Freud y de Lacan que luego impulsaría Anthony Wilden (Bateson 1985: 166-170; Wilden 1979). Expresó buena parte de la teoría configuracionista de la socialización acuñando palabras nuevas, como "protoaprendizaje" y "deuteroaprendizaje" (aprender a aprender), anticipando ulteriores desarrollos reflexivos de la cibernética de segundo orden y el "conocer el conocer" de los autopoiéticos (Maturana y Varela 2003: 5). Desarrolló lo que llamaba una teoría del juego y de la fantasía, centrada en el fenómeno de los marcos (*frames*) que metacomunican. Y concibió, ampliando el discurso sobre las disonancias cognitivas y el doble vínculo, toda una nueva teoría de la esquizofrenia, asomándose a ella como a un bien definido trastorno o paradoja de la comunicación familiar (1985: 231-308). El psiquiatra Jürgen Ruesch, trabajando con Bateson, habría de imponer luego este modelo en la psiquiatría contemporánea, construyendo el cimiento para la más detallada concepción de Paul Watzlawick (Bateson y Ruesch 1984; Watzlawick y otros 1981).

Por su parte, Watzlawick, Beavin y Jackson, quienes dedican a Bateson su obra conjunta, amplian el símil computacional poniendo, al lado de Shannon y Weaver, todo cuanto aporta la semiótica conductista de Morris, por la que Bateson (tal vez con buen olfato) no mostraba ninguna simpatía. Queda así constituída, en el seno mismo de la psiquiatría de avanzada, lo que se conoce como enfoque pragmático, una perspectiva que subsume lo psíquico, lo lingüístico y lo interactivo, extiendiendo sus incumbencias hasta la comunicación no verbal.

2.3.2.1.2 – Marcos y conceptos batesonianos

Aunque quienes recibieron su influencia no parecen haber sabido siquiera de la existencia de la obra etnográfica batesoniana, los antecedentes de lo que hoy se conoce como pragmática de la comunicación, terapia familiar sistémica o terapia comunicacional se remontan a las primeras observaciones de Bateson acerca de los modelos antropológicos necesarios para dar cuenta de los fenómenos de contacto cultural, aculturación y cismogénesis. Dichas observaciones fueron expresadas tan temprano como en 1935, como reacción frente a las estrategias sugeridas por el Social Sciences Research Council; las pautas académicas del Council intentaban estandarizar los procedimientos analíticos para clasificar los rasgos de una cultura en base a criterios que Bateson juzgaba inaceptables. Él creía que no es posible clasificar los rasgos culturales bajo encabezamientos tales como lo económico, lo social, lo religioso o lo ético, pues ello implica que cada rasgo tiene una función única o al menos una función dominante, y que la cultura puede dividirse en instituciones en la que los rasgos, agrupados en haces que los constituyen, son funcionalmente homogéneos. La debilidad de esta idea es manifiesta:

> Cualquier rasgo de una cultura, tomado por separado, demostrará al ser examinado, no ser solamente económico o religioso o estructural, sino participar de todas estas cualidades de acuerdo con el punto de vista desde el cual lo miremos. [...] De esto se sigue que nuestras categorías 'religioso', 'económico', etcétera, no son subdivisiones *reales* que estén presentes en las culturas que estudiamos sino meras *abstracciones* que adoptamos en nuestros estudios (Bateson 1985: 89).

Entre 1927 y 1933 Bateson permaneció en Nueva Guinea estudiando la tribu Iatmul. Un solo elemento cultural de esa etnía, el ritual de iniciación conocido como Naven, le brindó material para reflexionar sobre los diseños de investigación, el trabajo de campo y la epistemología. En ese estudio, incomprendido durante casi setenta años, Bateson había observado que en los procesos de cambio e interacción de la vida social se dan dos patrones de crisis o de equilibrio diferentes. Por un lado están los procesos "complementarios", en los que los participantes u oponentes asumen papeles de tipo sádico/masoquista, dominante/subordinado, exhibicionista/voyeur, etc. Por el otro se encuentran los procesos "simétricos" en los que se responde a la dádiva con la dádiva (como en el *potlatch*), a la violencia con la violencia, y así sucesivamente, como en los dramas sociales de Victor Turner. En ambos casos, la exacerbación de los comportamientos puede conducir a la quiebra, al estallido, a la inversión o a la anomia en el sistema social.

El 8 de marzo de 1946, en la primera de las Conferencias Macy de intercambio transdisciplinario (a las que asistían Norbert Wiener, John von Neumann, Warren McCulloch, Walter Pitts, Filmer Northrop, Arturo Rosenblueth y otros), Bateson oye hablar por primera vez del *feedback* negativo y lo relaciona con su concepto de esquismogénesis complementaria. Tiempo después, en el epílogo que en 1958 escribió para *Naven*, confiesa que la conceptualización cibernética del fenómeno era más clara, precisa y elegante que su descripción inicial, pero que en esencia ambas decían lo mismo: Bateson había descubierto un proceso cibernético antes que se fundara la ciencia capaz de definirlo (Bateson 1991: 55; Bale 1995). Al elaborar el esquema en el que tales procesos se tornasen comprensibles, Bateson tuvo que crear una por una sus categorías, pues ni la cibernética ni la teoría general de sistemas habían sido aún formuladas o lo estaban siendo recién entonces. Se necesitaban nuevas analogías que pusieran de manifiesto que las mismas clases de principios operaban en todas partes, que infundieran en el estudioso la convicción de que los tipos de operación mental que resultan útiles para analizar un campo también pueden resultarlo en otro, ya que el andamiaje de la naturaleza, el *eidos*, es el mismo en todos los niveles y en todos los dominios.

Al mismo tiempo, era preciso que esta convicción mística en la gran unidad del ser no se transformara en un desvarío analógico impropio, como el que regía las correspondencias, sustentadas por algunos, entre las sociedades y los organismos: el rigor de los razonamientos debía aliarse a la sensibilidad y a la capacidad de construir abstracciones que se refirieran a términos de comparación entre dos entidades dispares. En los inicios Bateson incurrió, según él mismo admite (1985: 108-109), en toda suerte de falacias, y más que nada en la falacia de concretidad, que le hacía manejar las entidades analógicas que iba creando o tomando en préstamo (*ethos*, *eidos*, estructura social) como si fuesen cosas concretas, capaces de ejercer influencias reales sobre otros objetos o entre sí. Para corregir esa visión, empero, sólo hacía falta advertir hasta qué punto los conceptos no son más que rótulos para las perspectivas asumidas por el investigador. Hacía falta, en otras palabras, alternar dialécticamente el pensamiento laxo, innovador, con una reflexión severa sobre ese mismo pensa-

miento, una idea que retomaría Edgar Morin. Tanto el impulso creador como el control reflexivo son esenciales, decía Bateson, para el progreso científico.

A fines de la década de 1930 y principios de la década siguiente se clausura para Bateson la etapa de las intuiciones oscuras, de la imaginación desbocada y de los modelos incipientes. Las ciencias duras, urgidas por la aceleración febril de la guerra y de la planificación tecnológica, comienzan a difundir precisamente el tipo de esquema que (creía él) la antropología y la psicología estaban necesitando. Lewis Richardson extrapola hacia la política la teoría de los juegos del matemático John von Neumann, Norbert Wiener difunde su cibernética, Ludwig von Bertalanffy su teoría sistémica y Claude Shannon su teoría de la información. Es posible comprobar entonces que los conceptos de cismogénesis y los que dan cuenta de la carrera armamentista no sólo exhiben cierto difuso aire de familia en el proceso de su *crescendo*, sino que se los pude describir y comprender un poco mejor echando mano de las mismas ecuaciones. Si bien algunos aspectos se revelan difíciles o imposibles de cuantificar (por ejemplo, la jactancia o el grado de rivalidad), unos y otros fenómenos remiten en última instancia a conjuntos análogos de relaciones formales.

También el artículo de 1942 dedicado a explorar el nexo entre la planificación social y los diversos tipos de aprendizaje abunda en hallazgos ingeniosos, al punto que podría decirse que con él se cierra la etapa del configuracionismo impresionista que operaba en un solo plano de realidad, comenzando la era del pensamiento integrador; esta era tendrá su primera culminación algo más tarde, en 1954, con "Una Teoría del Juego y de la Fantasía*"* (Bateson 1985: 205-222). En ese denso ensayo se origina además el concepto de *frame*, que servirá tanto a la microsociología como a la posterior teoría cognitiva de los *schemata*. En el texto en el que Erving Goffman caracteriza su *frame analysis*, ningún autor es más citado que Bateson (Goffman 1986). Pocos meses después Bateson lega definitivamente a la psiquiatría un marco comunicacional apto para comprender y tratar la esquizofrenia sobre la base del doble vínculo, entendido como pertubación de los códigos de la interacción, como patología de la comunicación, más que como la enfermedad de una persona:

> Nuestro enfoque se basa en aquella parte de la Teoría de las Comunicaciones que Russell llamó Teoría de los Tipos Lógicos. La tesis central de esta teoría es que existe una discontinuidad entre una clase y sus miembros. La clase no puede ser miembro de si misma, ni uno de sus miembros puede ser la clase, dado que el término empleado para la clase es de un *nivel de abstracción diferente* –un tipo lógico diferente– de los términos empleados para sus miembros. Aunque en la lógica formal se intenta mantener la discontinuidad entre una clase y sus miembros, consideramos que en la patología de las comunicaciones reales esta discontinuidad se quiebra de manera contínua e inevitable y que a priori tenemos que esperar que se produzca una patología en el organismo humano cuando se dan ciertos patrones formales de esta quiebra en la comunicación entre la madre y el hijo. [...] Esta patología, en su forma extrema, tendrá síntomas cuyas características formales llevarán a que la patología sea clasificada como esquizofrenia (Bateson 1985: 232).

Si el esquizofrénico contemplado por esta hipótesis es un producto de la interacción familiar, debería ser posible llegar a una descripción formal de las secuencias experienciales capaces de inducir tal sintomatología. Esta observación es esencial; porque, consciente de que las teorías que edifica son sólo constructos idealizados, Bateson logrará entregar los esquemas interpretativos de más amplias consecuencias teóricas y (según alegará la escuela que habría de formarse) de más eficaz aplicación clínica.

Algún día habrá que hacer el inventario de los conceptos propuestos por Bateson en una trama en la cual, sumados todos sus escritos, encontró la forma de vincular todos con todos: la diferenciación entre mapa y territorio (tomada de Alfred Korzybski); la identidad entre evolución, aprendizaje e información; la información definida como "la diferencia que hace una diferencia"; la búsqueda de la pauta que conecta como clave del saber, anticipando lo que las teorías de la complejidad llamarán clases de universalidad; la idea de que el mundo viviente, cultura incluida, se funda no en fuerzas causales sino en la información, clave de la distinción jungiana entre *pleroma* (lo no viviente) y *creatura* (lo viviente); y finalmente el doble vínculo, alrededor del cual se fundó un conjunto de escuelas psicológicas. Una sola observación batesoniana (la desemejanza que él encuentra entre los seres vivos y los productos culturales debida a la auto-repetición propia de las estructuras naturales) prefigura tanto lo que Douglas Hofstadter atribuyó a la recursividad en *Gödel, Escher, Bach* (1992) como los ulteriores descubrimientos de la geometría fractal de la naturaleza.

2.3.2.1.3 – Tipos lógicos, esquizofrenia, doble vínculo y comunicación

Por lo que se sabe del aprendizaje, los seres humanos emplean el contexto como guía y criterio para inferir a qué tipo lógico corresponde un mensaje. En consecuencia, para comprender la esquizofrenia lo que hay que buscar no es una experiencia traumática en la etiología infantil sino un patrón característico de secuencias en el cual el paciente adquiere los hábitos mentales propios de la comunicación esquizofrénica. Para caracterizar tales secuencias Bateson forja el término *doble vínculo* (o doble coacción, según se quiera traducir *bind*). El doble vínculo es una paradoja comunicacional en la que los mandatos que el paciente recibe están en conflicto recíproco, y en la que mandatos adicionales le impiden salirse del círculo vicioso.

Las condiciones de la comunicación esquizofrénica son enormemente restrictivas, tanto como es compleja la articulación de la teoría que de ella da cuenta, y que clama por ser expresada en un diagrama de flujo. Las condiciones presuponen un sistema familiar en el que el padre es débil o está ausente y en el que la madre o bien es hostil para con el niño, o bien le infunde temor. Si el niño se aproxima a la madre, ésta se retira. Si, en consecuencia, el niño también se retrae, la madre simula un acercamiento que niega su retirada. Su aproximación ficticia no es más que un comentario sobre su actitud anterior, un mensaje sobre el mensaje, de un tipo lógico más elevado. Esta secuencia se reitera indefinidamente. Si el niño comprende la diferencia entre los tipos lógicos de ambos mensajes, resulta de todos modos "castigado" por lo que su comprensión le revela: que la madre le rechaza, haciéndole creer que le quiere. Aún frente a sí mismo, el niño tiene que hacer como si no comprendiera la distinción. Tampoco puede acercarse a su madre, ni cuando ella se acerca (pués se retirará), ni mucho menos cuando ella se retrae. A partir de entonces, el niño queda acorralado, sin elección posible: cualquier actitud suya lo enfrenta a un castigo, pues es prisionero de una doble coacción. La única forma de eludirla sería mediante un comentario actitudinal sobre la posición paradójica a que su madre lo ha reducido. Pero su madre, de un modo u otro, le impedirá siempre metacomunicarse, atrofiando en él, como consecuencia, la capacidad necesaria para toda interacción social. El esquizofrénico, aún el adulto, es alguien a quien su contexto básico de interacción le ha inducido la imposibilidad (al principio fáctica, luego también lógica) de distinguir el nivel de tipificación de los mensajes; por ello el esquizofrénico toma al pie de la letra todo mensaje recibido o emitido, cerrándose, entre otras cosas, a la comprensión de las metáforas. El esquizofrénico no (se) metacomunica.

Tal es, en síntesis muy apretada, el núcleo de la teoría sobre la esquizofrenia desarrollada por el grupo interdisciplinario de Palo Alto, al que se integraron también el estudiante de comunicación Jay Haley, el ingeniero químico John Weakland y los psiquiatras William Fry y Don Jackson. En 1948, por incitación de Jürgen Ruesch, Bateson había abandonado la antropología para dedicarse a tiempo completo a la investigación psiquiátrica, en la que persistirá hasta principios de la década de 1960, cuando la disciplina que abraza deja de tener un nombre. Bateson siguió después inspeccionando otros caminos, derivados de su expresiva interpretación de las observaciones aportadas por los nuevos paradigmas; estos caminos pertenecen, en todo caso, a la historia de una antropología cuyos límites disciplinarios parecían disolverse, confundiendo sus preocupaciones con las de otras especializaciones académicas.

Aquí, empero, seguiremos otras pistas, y no porque aquéllas carezcan de interés. A fin de cuentas, la teoría del doble vínculo era una solución a problemas lógicos que se presentaron a Bateson al analizar su material de campo Iatmul y balinés. En los ulteriores escritos batesonianos ese material asoma de cuando en cuando (cada vez más espaciadamente, por cierto), casi siempre al servicio de la ejemplificación didáctica de la dimensión cultural o de la puntuación del contexto. En las siguientes etapas de lo que dió en llamarse terapia sistémica, el repertorio de los casos aducidos perdió entidad etnográfica, con la consecuente depreciación de los aspectos contextuales que conferían al estudio su distintividad. En pocas palabras, las disciplinas laboriosamente reunidas por iniciativa de Bateson volvieron a distanciarse, encerrándose en su especificidad.

Hay que admitir que la hipótesis del doble vínculo no era fácil de comprender. Incluso algunos de los allegados a Bateson prefirieron profundizar sus facetas psicologizantes, subrayando la presencia de una madre ansiosa y castradora y de un hijo ambivalente; o destacaron sus connotaciones conductistas, entendiendo todo en términos de estímulos, castigos, refuerzos y recompensas. Tras unos años de euforia y tras varias docenas de experimentos en pos de verificación clínica, la teoría comenzó a saborear el fracaso, producto de la nucleación indebida en torno de algunos de sus aspectos en detrimento de su sentido de conjunto. Este proceso se profundiza en lo que José Bebchuck llama "período de la segunda formalización" de la terapia sistémica, signado por la edición, en 1967, de *Pragmatics of Human Commmunication*, de Watzlawick, Beavin y Jackson (1981).

En un artículo breve de 1963, el equipo liderado por Bateson, saliendo al cruce de desviaciones simplistas, insistió en que el doble vínculo no debía concebirse como una relación entre víctima y verdugo, sino como una fatalidad comunicacional que se establece entre personas desconcertadas por la paradoja. Pero a pesar de esta última concordancia, aquí es, en concreto, cuando las opiniones en el interior del grupo comienzan a diferir, ocasionando el distanciamiento de su conductor. Para Bateson, la esquizofrenia no era más que un momento aplicativo de la teoría de la comunicación, la cibernética y el principio de los tipos lógicos.

> Ante todo, permítanme decirles que, aunque haya cuidado de varios pacientes esquizofrénicos, jamás me he interesado intelectualmente por ellos, en tanto tales. Lo mismo es cierto con respecto a mi trabajo con las culturas indígenas de Nueva Guinea y de Bali. Mi interés intelectual se ha concentrado siempre en principios generales que estaban subsecuentemente ilustrados o ejemplificados por los datos. Lo que quiero saber es: ¿De qué clase de universo se trata? ¿Cómo puede describírselo mejor? ¿Cuáles son las condiciones necesarias y los

> límites de la experiencia de la comunicación, de la estructura y del orden? (Bateson 1966: 416).

Tal como lo hace notar Yves Winkin, Bateson opera aquí una completa transformación de la perspectiva: su foco ya no es el doble vínculo en el seno del sistema familiar esquizofrénico, sino el sistema familiar en el seno de la doble coacción (Winkin 1984: 43). Para Don Jackson, en cambio, la esquizofrenia siguió constituyendo el universo y el horizonte de sus intereses. Jackson fue el mentor inicial de la pragmática de la comunicación, la cual añade a los modelos de Bateson un mayor prurito formal, una cierta deflación de los aspectos vinculados con la matriz social de la que hablaba Jürgen Ruesch (Bateson y Ruesch 1984) y un puñado de distinciones semióticas inspiradas en Charles Morris.

De allí, precisamente, lo de "pragmática", entendida como la dimensión de la semiosis atinente al uso que los actores hacen de los signos. La teoría en cuestión es largamente batesoniana en su diseño global, pero, aparte de referencias a la semiótica conductista que le confieren un aire heterogéneo, hay poco en ella de novedoso: una presentación de los razonamientos más sistemática que la de Bateson (aunque también más aburrida) y una clasificación amorfa e incompleta de los tipos básicos de paradoja comunicacional. Lo que era aceptable en la obra pionera de Bateson como tanteo exploratorio, en esta teoría deviene puro anacronismo. Esto es lo que sucede, por ejemplo, con la distinción entre comunicación analógica y comunicación digital, uno de los aportes batesonianos más endebles, fruto de una indistinción verdaderamente esquizoide entre diferentes tipos lógicos. La hipótesis de Paul Watzlawick es que los seres humanos se comunican tanto digital como analógicamente:

> El lenguaje digital cuenta con una sintaxis lógica sumamente compleja y poderosa pero carece de una semántica adecuada en el campo de la relación, mientras que el lenguaje analógico posee la semántica pero no una sintaxis adecuada para la definición inequívoca de la naturaleza de las relaciones (Watzlawick y otros 1981: 68).

Se insinúa, además, que la comunicación analógica (por lo común, no verbal) tiene sus raíces en períodos mucho más arcaicos de la evolución, y que por lo tanto encierra una validez más general que el modo digital de la comunicación verbal, relativamente reciente y mucho más abstracta. Una de las causas o de las manifestaciones típicas de la patología comunicacional sobreviene cuando un mensaje analógico se toma por digital, o a la inversa.

Pero todo este razonamiento es, al margen de su plausibilidad, sustancialmente erróneo. Obsérvese, en principio, que el nivel de tipificación y sustantividad en el que es pertinente la distinción entre lo analógico y lo digital no ha sido elucidado: en esta hipótesis nos encontramos tanto con "comunicación" como con "mensajes", "códigos", "contextos", "términos" y "lenguajes" que (según se pretende) pueden ser tanto analógicos como digitales, todo ello con referencia metafórica a tipos de computadoras cuyos atributos han sido mal caracterizados. No es cierto, pongamos por caso, que "en las computadoras analógicas los datos adoptan la forma de cantidades discretas y, por ende, siempre positivas" (p. 62), pues (*a*) puede haber cantidades discretas negativas y (*b*) es la continuidad (y no el carácter discreto) lo que define desde el principio el modo de operar de una computadora de esa clase. Piénsese, sin ir más lejos, en una balanza clásica, incapaz de medir según pasos discretos. Tampoco está bien fundada la postura que vincula lo analógico con lo gestual y lo digital con lo verbalizado, o que afirma que "en el lenguaje analógico es imposible decir que no", mientras que en el lenguaje verbal la significación es unívoca. Pues, siempre de acuerdo con convenciones precedentes, "si" y "no" son fácilmente expresables en la comunicación

kinésica (moviendo la cabeza, por ejemplo), mientras que términos verbales como "símbolo" o "conciencia" poseen una denotación borrosa.

Dado que es factible expresarse con mayor o menor abstracción en uno u otro tipo de código y siendo posible metacomunicar analógicamente sobre un mensaje digital o a la inversa, no existe correspondencia entre la clase de comunicación de que se trate y su nivel relativo de tipificación lógica. En suma, la distinción no sólo es indebida, sino también engañosa. Con Watzlawick y el grupo de Palo Alto lo que fue en principio una diferenciación insegura termina transformándose en una reificación: las propiedades de la forma de tratamiento de las cosas se transforman de repente en atributos de las cosas mismas. La teoría cosifica, atribuyendo a lo real sus distinciones discursivas. Prestemos atención a la presencia de Watzlawick entre bastidores: cuando formule su versión del constructivismo, él habrá de proyectar sobre la realidad sus propios vacíos conceptuales y, en un acto ontológico que Bateson nunca hubiera suscripto, consumará la negación de la realidad misma (Watzlawick 1994; Watzlawick y otros 1989).

La terapia sistémica de las primeras décadas ya llevaba la distinción entre analógico y digital al extremo absoluto. No es ésta, sin embargo, la única objeción que cabe hacerle a los pragmáticos. Como dice José Bebchuk,

> Aunque en su momento esta obra [*Pragmatics of Human Communication*] fue vista como una Summa pragmática, también es verdad que considerada desde el presente da la impresión de haber desaprovechado la riqueza fabulosa de los períodos previos tan llenos de intuiciones, tanteos, hallazgos y descubrimientos. El mencionado desaprovechamiento fue el resultado de tres limitaciones poderosas: a) el modelo diádico; b) la exclusión de la subjetividad, y c) una lógica científica deficitaria (Bebchuk 1987: 2).

A esta lógica insuficiente ya la vimos en acción: la falacia de la concretidad mal aplicada, oportunamente denunciada por Bateson, había sido introducida de nuevo por la puerta trasera, una puerta que él mismo había dejado abierta. Pese a que los trastornos de la comunicación se definían en base a las pautas vigentes en la cultura en que esa comunicación se manifiesta, la dimensión sociocultural se había encogido hasta el umbral de lo perceptible, al extremo que la pragmática de Palo Alto dejó de interesar a los antropólogos. La concentración obsesiva en la relación diádica madre-hijo había anulado, por añadidura, la dimensión sistémica del fenómeno, que resultaba así analizado a través de un modelo mecánico convencional del tipo emisor-receptor, con referencias sólo ocasionales al contexto. En lenguaje sistémico, se diría que en lugar de un sistema abierto, relativo a la complejidad organizada, el modelo delineaba un sistema cerrado, lineal, simple, que sólo trataba una región de la jerarquía de subsistemas, sin llegar al sustrato biológico o al plano social; a la larga, el foco del modelo terminaba siendo un juego mecánico entre dos entidades, con una pizca de *feedback* aquí y allá.

No es de extrañar tampoco que la tendencia general de las instituciones sistémicas de linaje batesoniano sea hacia una fisión continua y hacia una multiplicación desenfrenada de pequeños cenáculos en beligerancia mutua. Las crónicas nos hablan, en efecto, de una terapia familiar bifocal, enfrentada con una terapia familiar estructural, contrapuesta a su vez a una terapia múltiple, a otra terapia simbólico-experimental y a otra modalidad más, conocida como terapia de red, la única, incidentalmente, que echa mano de categorías y métodos de orden etnográfico (Speck y Attneave 1974; Simon, Stierlin y Wynne 1988: 360-405). Las escuelas, grupos de influencia e instituciones se han multiplicado hasta tal punto que la cla-

sificación de las orientaciones sistémicas ha devenido un juego de ingenio recurrente: quien nombra más cofradías, gana (Giacometti 1981). Este proceso de bifurcaciones cismáticas ya lleva unos buenos treinta años, y no muestra señales de querer llamarse a reposo.

La terapia familiar sistémica de la década de 1990 y los años siguientes sigue reclamando la herencia de Bateson, aunque para renovarse ha incorporado ideas provenientes de la segunda cibernética, el conexionismo, la autopoiesis de Humberto Maturana, la cibernética de segundo orden de Heinz von Foerster, el constructivismo radical de Glasersfeld y hasta una tercera cibernética que da una nueva vuelta de tuerca a un pequeño puñado de ideas (Pakman 1991; Fischer y otros 1997). Por más que en las historias internas de la antropología el nombre de Bateson siga sin aparecer a cien años de su nacimiento, su rostro sigue mirando hacia la cámara en las páginas de docenas de comunidades que todavía elaboran pensamientos suyos en la Internet del tercer milenio. Extraño destino para un conjunto de interrogantes que un antropólogo se planteó alguna vez en las selvas de Nueva Guinea.

2.3.2.1.4 – Críticas a la epistemología de Bateson

Tal vez la crítica que sigue no involucre un acto de justicia, pero lo concreto es que en las tendencias actuales que responden a los modelos batesonianos se perpetúan muchos de los problemas conceptuales y metodológicos que se perciben en la obra del fundador. Si bien Bateson producía el efecto de estar sintetizando saberes inmensos, la realidad es que su régimen de lecturas fue siempre muy escueto, según lo revelan sus referencias bibliográficas y las infidencias de sus allegados. Mary Catherine Bateson, en efecto, confiesa en "Cómo nació *Angel Fears*": "Pienso que mi padre no tuvo en su vida más que algunas ideas, muy pocas" (1992: 23). En *Como yo los veía* insiste: "No tenía muchas ideas: durante toda su vida indagó un conjunto pequeño de temas sumamente abstractos. … Gregory leía muy poco, incorporaba a su pensamiento apenas dos o tres libros por año, como si protegiera su capacidad a concentrarse" (1989: 99, 173). Y en *El temor de los ángeles* admite que Bateson, "siempre parco en sus lecturas", excluido de la academia y sin una fuente regular de ingresos en sus últimos años, no tuvo más remedio que repetir y recombinar viejos componentes de su pensamiento, sin hacer los ajustes necesarios y sin llevar a cabo la integración que esos elementos exigían (Bateson y Bateson 1989: 18).

Fritjof Capra recuerda que la falta de interés de Bateson por la física se ponía de manifiesto en los errores que solía cometer al hablar de dicho tema, como confundir la materia con la masa y cosas por el estilo; también se aburría en el medio de sus conferencias, dejando cabos sueltos, omitiendo elaborar las conclusiones, negándose a contestar preguntas que no estimaba interesantes o contestándolas mediante chistes y metálogos a los que también dejaba inconclusos (Capra 1994: 84, 90). Clifford Geertz pensaba que Bateson poseía una mente vivaz y metía las narices en variedad de problemas, pero se aburría con facilidad (Anton-Luca s/f). David Lipset (1980: xii) cree que Bateson estaba en muchos sentidos muy por delante y muy por detrás de sus contemporáneos; en sus últimos años, por ejemplo, no manifestaba interés alguno por estar al tanto de los avances experimentados por los campos en los que había incursionado. Un amigo de Bateson, el kinésico Ray Birdwhistell, consigna elementos de juicio coincidentes:

> La debilidad [de Bateson] dentro del grupo provenía de su rechazo profundo por los datos, se integraran o no a sus generalizaciones. Para ser franco, yo diría que los datos lo mortificaban. Además, una debilidad que siempre dificultó el trabajo con él fue su falta de dominio

> de la teoría lingüística general, que él simplificaba por omisión, como hizo con la teoría de los 'sistemas', la semántica o la 'doble coacción'. … Su propia visión de los hombres era casi simplista, llena de analogías y de dibujos animados, y formulada a través de juegos de palabras. … Nunca comprendió el pragmatismo porque no conocía el trasfondo. Sus sectores y pedazos de pensamiento del siglo XX, Whitehead y Russell, y von Neumann, etc, no resultaron jamás organizados en un conjunto operativo dentro de una disciplina. Sus métodos eran casi siempre analógicos, artísticos y estéticos; sus reivindicaciones según las cuales su pensamiento era 'científico' no resultaban, por cierto, muy convincentes (Carta personal de Birdwhistell a Wendy Leeds-Hurwitz, citada en Leeds-Hurwitz 1991: 63-64).

Al margen de la liviandad de sus conocimientos extradisciplinarios de carácter técnico, se podría imputar a Bateson una preferencia por recursos conceptuales que ya estaban cayendo en desgracia en la época en que los adoptaba; esto es lo que Yves Winkin (1991: 69-70) llama "el fértil anacronismo de Bateson", que le llevaba a librar extraños combates teóricos, aparentemente superados. El más notorio de los conceptos anacrónicos es, naturalmente, el que concierne a la tipificación lógica, una idea contingente a cierto momento de la historia de las metamatemáticas a la cual algunos batesonianos, como Anthony Wilden y los teóricos de la autopoiesis, siguieron usando como si fuera una poderosa herramienta estructuradora. Tras la cancelación del proyecto de Hilbert, y sobre todo después de Gödel, la utilidad formal de los tipos lógicos se percibe modesta y periférica. En la práctica, ese principio (promovido a "teoría" por los batesonianos) no tiene mucho que ver con conjuntos que se incluyen a sí mismos, o con las paradojas de la auto-referencia, sino que se traduce en precauciones a tener en cuenta para no mezclar indebidamente niveles de análisis, o consejos para no confundir las metáforas con los sentidos literales. Es obvio que no hace falta invocar las metamatemáticas para eso; con el sentido común habría sido suficiente. En las nuevas ciencias del caos y la complejidad el concepto de tipificación lógica ni siquiera figura en los índices. Por el contrario, algunos creen que los tipos lógicos inhiben o entorpecen el pensamiento recursivo, que a la larga sería bastante más esencial. Puede verse un inventario de razones para desprenderse de la teoría de tipos, "una teoría insignemente fea", en el texto cardinal de Douglas Hofstadter (1992: 24-26), quien abriga una concepción que se encuentra más cerca de Kurt Gödel que de Bertrand Russell.

Tal vez como consecuencia de la precariedad de sus fundamentos formales, el intento de renovación de las teorías y las prácticas a partir de las ideas de Bateson no coaguló en una reformulación instrumental, salvo para grupos cerrados de fieles que apenas fallecido el maestro se volcarían en masa hacia el subjetivismo de la autopoiesis primero y hacia el nihilismo del constructivismo radical después. Los antropólogos, mientras tanto, muestran no saber qué hacer con este género de investigación; la mayoría ha optado por hacer como que no existe, al extremo que hoy Bateson pertenece más al movimiento *new age* que a la antropología (Thompson 1995).

Bateson, en suma, no ha logrado integrarse a la corriente principal de la disciplina. Excepto para especialistas y heterodoxos, su legado se considera secundario, aunque años más tarde, cuando llegue el momento de la complejidad y el caos, ningún otro antropólogo se perciba como el que anunciara con más lucidez lo que estaba por venir. Conjeturo que más allá de las dificultades para coordinar una metodología proactiva persisten diversas trabas de orden conceptual: una fatigada distinción entre los lenguajes analógico y digital; una extrapolación del marco cibernético que es más literaria que científica, más episódica que sistemática; una visión convencional de la trayectoria y el cambio estructural en el interior de los sis-

temas que enfrenta con mejor rendimiento los fenómenos de homeostasis que los de morfogénesis, como se hará evidente luego en la teoría autopoiética; un desinterés casi activo por la búsqueda de la validez transcultural de las propuestas; y una alusión demasiado leve al medio sociocultural, que en el pequeño contexto de una familia sin entorno opera como marco inarticulado, sin participación real en el diseño sistémico. Así y todo, hoy en día es ostensible que en la antropología del siglo veintiuno no vendría mal que surgiera un nuevo Bateson, sensible a las paradojas y capaz de imaginar nuevas metáforas.

2.3.2.2 – Sistemas sociales autorregulados: Siegfried Nadel

Aparte de Bateson, uno de los antropólogos que más tempranamente acusó el impacto de la cibernética ha sido Siegfried Nadel (1953), quien le dedicó un artículo breve pero sustancial. En él Nadel propone distinguir entre los controles sociales más explícitos, intencionales y formalizados, apoyados por castigos y recompensas, y un proceso auto-regulador más fundamental inmanente a los sistemas sociales. Afirma que las costumbres, el hábito social, las normas y las expectativas no son en sí mismas las bases del orden social, y por lo tanto se requiere una de dos condiciones para funcionar efectivamente: o bien se considera que la conducta normativa es en sí misma deseable y por ello se la valora, o bien la conducta se constituye en una rutina que permite obtener mayor éxito con menor riesgo. Para Nadel, esos serían los verdaderos elementos de la auto-regulación. Tales mecanismos prestan apoyo a las estructuras y procesos sociales más importantes, y conforman un nexo instrumental o complejo de relaciones ramificadas entre los diversos medios y fines de la sociedad.

Eso significa que la adhesión a la conducta canalizada socialmente conduce, en el curso natural de los hechos sociales, a "premios" (no "recompensas"), mientras que la desviación lleva a "penalidades" (no "castigos"). Así, en una sociedad folk, el varón que no contrae matrimonio, comprueba que muchas de las cosas a las que su comunidad otorga valor no están a su alcance a causa de su condición de soltero, aunque no se le dispensa nada que se parezca a una penalidad.

Habría, por lo tanto, según Nadel, un proceso circular de retroalimentación en la base de esta auto-regulación. En el proceso de llevar a cumplimiento las normas se demuestra la validez de las conductas sancionadas como positivas; las transacciones implicadas generan información que promueve la adopción ulterior de esas líneas de conducta. No podemos apelar simplemente a los "controles sociales" de la crítica pública o de la educación institucionalizada, pues éstas no sólo salvaguardan, sino que presuponen valores, y por lo tanto representan no tanto controles que actúan desde fuera sobre la conducta deseada, sino fases en un proceso circular en virtud del cual los valores engendran conducta y la conducta refuerza los valores (p. 272). Eso sí, Nadel advierte que este tipo de auto-regulación es particularmente característico de las sociedades primitivas y folk; las sociedades complejas, muy diferenciadas y heterogéneas, no admiten con facilidad este tipo de cohesión.

Mientras que los trabajos más tempranos de Nadel, como *The foundations of social anthropology*, de 1951, ignoran toda referencia al programa cibernético, otros textos mayores apenas un poco más tardíos, como *The theory of social structure*, de 1957, aprovechan los puntos de vista dinámicos expresados en el artículo que ya comenté para fundamentar una crítica al modelo sociológico del equilibrio. Integrando ideas wienerianas y otras influencias parecidas, Nadel concluye que, "como lo señaló alguna vez [Meyer] Fortes, la estructura social debe ser 'visualizada' como 'una suma de procesos en el tiempo'. Con palabras pro-

pias, yo diría que la estructura social es, de modo implícito, una estructura de acontecimientos" (Nadel 1957: 128). De allí en más, no puede afirmarse que una sociedad dada posea una estructura integral y coherente. Siempre hay fisuras, disociaciones, enclaves, de modo que cualquier descripción que pretendiera exponer una estructura única y permanente, de hecho presentará una imagen fragmentaria o unilateral (p. 153).

Aunque esta clase de procesualismo sea habitual en los días que corren, en aquellos tiempos el funcionalismo estático era dominante; la terminología era más insulsa y la sintaxis sociológica más acartonada, hasta el extremo de la monotonía. Sin duda la cibernética, aún sirviéndose en su origen de formas de expresión muy distintas, jugó algún papel en los cambios de visualización y nomenclatura que propuso Nadel en ambos textos. El primer artículo, por su parte, carga ya con cincuenta años a sus espaldas. Desde nuestra perspectiva uno se pregunta si hace falta una argumentación cibernética para ilustrar lo que otros autores llamarían internalización de valores o enculturación, o si es lícito abstenerse de indagar qué pasaría en el caso de los sistemas complejos, cuando se supone que la teoría adoptada está, desde el vamos, equipada exactamente para esa clase de escenarios. No obstante, la redefinición de Nadel tiene su toque de creatividad en el giro que habla de la realimentación mutua entre valores y conductas, así como cierta sutileza conceptual en la adopción de palabras semejantes a las tradicionales, pero un poco más sensibles a los hechos. Y no está mal que la lectura de un modelo matemático seco y austero inspire ideas e insinúe heurísticas, imágenes y conceptos, por más que se los adopte como metáforas provisorias en textos que nadie volverá a leer.

2.3.2.3 – La Ecosistémica de Roy Rappaport

Diré antes que nada que quien busque en los primeros textos de Roy Abraham "Skip" Rappaport (de la Universidad de Michigan en Ann Arbor) referencias directas a la cibernética o la teoría de sistemas no siempre las encontrará. El modelo en el que él se inspira inicialmente es el de la ecosistémica, una tendencia dentro de los estudios de ecología en general basada a su vez en la cibernética y en la teoría de sistemas a través de nexos que no siempre han sido explícitos, pero que con un poco de trabajo se pueden identificar.

Desde la década de 1960 Rappaport ha venido explotando la posibilidad de utilizar en ecología cultural criterios y conceptos de la versión sistémica de la ecología animal. La inspiración del modelo procede en su mayor parte de las obras del inglés Vero Copner Wynne-Edwards. Este estudioso del comportamiento animal sostenía que muchos animales sociales practican una especie de autorregulación determinando el número de su población y limitando su densidad conforme a valores promedio que se encuentran debajo de la cota que podría llegar a ser dañina para el ambiente. Se supone que las poblaciones autorreguladas poseen varias formas para medir el exceso de densidad que se conocen en conjunto como "señales epideícticas". Rappaport proyectó estas ideas a la antropología, postulando que el uso de un marco conceptual generalizado y la consideración del agregado humano como una población ecológica conmensurable con otras unidades con las que el grupo actúa formando redes alimentarias, comunidades bióticas y ecosistemas, hace que las interacciones resulten susceptibles de medición. Los estudios de Rappaport, en efecto, están atestados de mediciones de consumo de alimentos, peso de cosechas, número de animales, cantidad de tierra cultivada, lluvia caída, tiempo invertido en el trabajo y participantes en un festín ritual.

Rappaport propone distinguir entre el "entorno operacional" y el "entorno cognitivo", o sea entre el modelo *etic* del entorno sustentado por el analista y el modelo *emic* reconocido por la comunidad bajo estudio; entiende además que ambos modelos se clarifican mutuamente. Aunque es posible considerar las interacciones materiales de una población sin referencia a los modelos cognitivos, estima razonable concebir la cosmovisión de un pueblo como parte del mecanismo que induce a las personas a comportarse como se comportan y como elemento para enriquecer la comprensión de las relaciones materiales. Propone entonces investigar en términos sistémicos los mecanismos que hacen que las variables del conjunto se mantengan dentro de rangos tolerables, evitando que se manifiesten oscilaciones que pongan en crisis la continuidad del sistema. Mantener aplanada la amplitud de las oscilaciones es, como se ha visto, la misión esencial de los mecanismos de control retroalimentantes. En los sistemas ecológicos en los que interviene el hombre, es de esperar que los mecanismos de auto-regulación incluyan importantes componentes culturales bajo la forma de sistemas simbólicos, pautas de conducta o racionalizaciones.

Los rituales de los Tsembaga, un grupo Maring de Nueva Guinea, son el ejemplo escogido por Rappaport y desarrollado en numerosos artículos y en un libro que se ha convertido en un clásico: *Cerdos para los Antepasados* (Rappaport 1968). En respuesta a cambios que ponen en peligro los estados de ciertas variables, se "dispara" el ritual, lo cual tiene el efecto de retornar el estado del sistema dentro de un rango óptimo. Rappaport alega que la señal epideíctica clave para los Tsembaga es la intensidad del trabajo femenino. En la división sexual del trabajo de las sociedades Maring, las mujeres se encargan del cuidado de los cerdos, de la atención de las huertas y de preparar la comida. Estas son tareas pesadas. Inmediatamente antes de la matanza ritual de cerdos (el festival del kaiko), éstos llegan a consumir cerca del 80% de la mandioca cosechada y el 50% de las patatas dulces. Las huertas son casi 40% más grandes antes de la matanza que después. De acuerdo con las estimaciones, la intensidad del trabajo femenino es proporcional a la cantidad de cerdos, siendo de este modo un indicador simple y directo de la calidad ambiental. La única respuesta para aliviar un trabajo excesivo es en este caso el kaiko, el cual suele ser asimismo preámbulo de guerras intertribales. De esta forma, el ciclo ritual puede interpretarse como un instrumento para reducir tanto la población de cerdos como la humana; y, correspondientemente, cerrando el bucle, el trabajo requerido para reconstituir la piara hasta el advenimiento de otro ritual impide las guerras excesivas. Se sigue que el ciclo ritual es un homeostato que regula las poblaciones referidas, la dispersión de los grupos, el estado nutricional y la cualidad ambiental en su conjunto.

En otras publicaciones ("Naturaleza, Cultura y Antropología Ecológica", de 1956), Rappaport justifica su enfoque subrayando no tanto lo que diferencia la cultura humana de las comunidades animales sino más bien lo que es común a ellas: su equivalencia funcional. No importa, desde el punto de vista del sistema, que la conducta del cazador humano sea cultural y la del predador animal no lo sea, si sus propósitos son comparables. Podemos decir con seguridad –alega Rappaport– que las culturas o sus componentes forman parte principal de los medios distintivos usados por las poblaciones humanas para satisfacer sus necesidades biológicas en los ecosistemas en que participan. Considerar la cultura de este modo (como lo han hecho él y su colega Andrew Vayda) no va en detrimento lo que pudieran ser sus características únicas ni demanda ningún sacrificio de los objetivos tradicionales de la antropología. Por el contrario, mejora esos objetivos proponiendo otros interrogantes acerca de los fenómenos culturales. Podemos inquirir, por ejemplo, qué efectos particulares tienen

las reglas de residencia y filiación o prácticas como la guerra sobre la dispersión de las poblaciones respecto de los recursos disponibles, los efectos de los ritos religiosos sobre las tasas de nacimiento y defunción y, en fin, podemos averiguar las formas mediante las cuales el hombre regula los ecosistemas que domina.

A menudo los rangos de viabilidad de las variables de un sistema se establecen empíricamente. En lo que se refiere por ejemplo al tamaño de una población, es casi seguro que por debajo de cierto valor mínimo la población no puede reproducirse a sí misma, y por encima de cierto valor máximo agotaría sus bases de subsistencia. En este caso, el "entorno cognitivo" (el modelo ambiental sustentado por los actores) actúa como la memoria de un computador o el mecanismo regulador del sistema que se encarga del control "automatizado" de un proceso. En este sistema, las señales concernientes al estado de las variables se comparan a los valores ideales de referencia, y en caso que los valores sean críticos se inician programas de normalización. Cuando más rutinaria y ritualista sea la pauta simbólica, tanto más automática será la respuesta de la población a las presiones del entorno y más autorregulado se presentará el sistema ante el análisis. Mediante este símil, podemos averiguar, de una manera razonable, cuál es el valor adaptativo de una ideología.

En 1971 Rappaport publica en *American Anthropologist* un artículo titulado "Ritual, Santidad y Cibernética" en el que analiza (ya satisfecho el estudio de los valores homeostáticos del ritual) los aspectos comunicacionales e informacionales del mismo. En este artículo establece con mayor claridad sus relaciones de dependencia con la teoría de sistemas y la cibernética. Como uno de los indicadores de la influencia sistémica en Rappaport anotemos el uso de su definición de sistema. Él no utiliza el término para designar una colección de entidades que comparten alguna característica ontológica, como la que implican las nociones de sistema religioso o sistema de parentesco; lo usa en cambio en el sentido de un conjunto de variables tal que el cambio del valor del estado de una de ellas acarrea cambios en el valor del estado de al menos otra variable, lo cual es consistente con los criterios de Ross Ashby (1972a: 60-63) para delimitar un sistema en el sentido cibernético de la palabra.

> Las características ontológicas de los componentes del mundo físico de los cuales se derivan las variables son irrelevantes. Podemos incluir en el ámbito de un solo sistema o subsistema variables abstraídas de fenómenos culturales, biológicos o inorgánicos (Rappaport 1971: 59).

En opinión de Rappaport, el ritual es un mecanismo de comunicación altamente estilizado, comparable a las exhibiciones eróticas que los etólogos han estudiado en los animales. Desde esta perspectiva, el ritual podría redefinirse como "un conjunto de actos convencionales de *display* a través del cual uno o más participantes transmiten, tanto a ellos mismos como a los demás presentes, información concerniente a sus estados fisiológicos, psicológicos o sociales". El ritual vendría a ser un mecanismo indicador del estado de ciertas variables. Tanto el contenido como la ocasión de ocurrencia de esos rituales son pertinentes en esta comunicación. El contenido no sólo se compone de referencias estructurales, como se reconoce habitualmente, sino que incluye también información cuantitativa, más allá del dato obvio del número de participantes. Incluye además una especie de alusión métrica, analógica, representada por los valores que se consumen o se distribuyen.

Con el correr de los años, y bajo el hechizo de la moda interpretativa, Rappaport se fue interesando por lo que antes definía como el entorno cognitivo. En 1975 su modelo adquiere una contextura mixta, a mitad de camino entre una visión *etic* materialista similar a la de

sus primeros estudios y una concepción hermenéutica (no necesariamente *emic*) relacionada con las ideas de Clifford Geertz. Esta postura es explícita, y consta en una ponencia titulada "Meaning and Being": el significado al que se alude es el conjunto de sentidos subjetivos que posee el ritual, en términos geertzianos; el "ser" es la dimensión objetiva de la ceremonia como mecanismo de control global de un sistema.

Más tarde, Rappaport (1979) publica una compilación de siete ensayos con una introducción en la que reafirma sus compromisos sistémicamente más puros por un lado y atenúa la parte *etic* de sus modelos por el otro. Rappaport caracteriza su punto de vista como una especie de nuevo funcionalismo que difiere del anterior por su atención a los mecanismos cibernéticos de auto-regulación; como lo expresó después uno de sus críticos (el fenomenólogo Johannes Fabian), tenemos aquí a Malinowski reformado por Bateson. En este libro Rappaport también responde a sus críticos, en especial a Jonathan Friedman y a Marshall Sahlins (la compilación es tres años posterior al manifiesto antimaterialista de Sahlins, *Cultura y Razón Práctica*). Esas críticas no habían sido de buena calidad, como puede inferirse del recargado didactismo de este párrafo de Friedman:

> El materialismo vulgar, el materialismo mecánico y el economicismo son términos que se refieren a una forma simplista de materialismo, rechazada por Marx, que contempla las formas sociales como meros epifenómenos de tecnologías y ambientes, ya sea por causación directa o por alguna racionalidad económica que hace a las instituciones el producto de la optimización social. Esta estrategia ha hecho su aparición en la forma que Marshall Sahlins ha llamado el "nuevo materialismo" …, la ecología neo-funcional y el materialismo cultural, ambos insertos en la ideología funcionalista-empirista que ha caracterizado a la mayor parte de la ciencia social americana (Friedman 1974: 456-457).

En esos años, muchos de quienes habían sido materialistas abandonaban sus convicciones científicas e ideológicas y se sumaban a las nuevas corrientes como se pudiera, sin guardar las formas. También Rappaport acusó el impacto; los textos más tardíos de su compilación tienen un costado regresivo, pues concedieron demasiada relevancia a los significados como mediadores entre el entorno cognitivo y el entorno real. Débil desde el principio, su fundamentación materialista se diluyó y él mismo terminó abrazando un culturalismo no declarado, desde el cual, para sosegar a los objetores, otorgó a la cultura ideacional un estatuto casi autónomo. Hubiera sido interesante que Rappaport desarrollara sus ideas a fondo y sin interferencias; pero el espíritu de los tiempos fue más fuerte, y se cobró con él (y con la ecosistémica) una de sus víctimas más calificadas.

2.3.2.4 – Críticas y alternativas procesuales a la ecosistémica

Han existido dos líneas de crítica a modelos como los de Rappaport y a otras concepciones semejantes. La primera conserva los objetivos y principios de la ecología cultural, pero no necesariamente se atiene a marcos de cibernética o teoría de sistemas. La segunda propone abandonar los marcos sistémicos y el estudio del vínculo entre cultura y ambiente, y concentrar la investigación en los procesos singulares o en los sujetos, también singulares. Revisaremos ambas líneas en ese orden.

Los trabajos de Rappaport han sido impugnados por los especialistas en ecología genérica y por los participantes de esa experiencia peculiarmente norteamericana que fue la ecología cultural. Las obras más cuestionadas han sido las primeras, y en especial su texto clásico sobre los rituales Tsembaga. MacArthur y Buchbinder, separadamente, han presentado evi-

dencia de que los Tsembaga no están muy bien alimentados, una condición que es inconsistente con la idea de Rappaport de que la población sabe regularse por debajo del nivel de riesgo ambiental. Algunos autores (Bates y Lees, Samuels, Peoples) han señalado que no está claro el modo en que los requerimientos de equilibrio propios del conjunto social se traducen en incentivos de la conducta individual concreta. Otro crítico (Salisbury) afirma que los Tsembaga han permanecido muy poco tiempo en su ambiente (unos docientos años) como para haber desarrollado el modelo adaptativo finamente ajustado que propone Rappaport (Foin y Davis 1987).

En el momento de su publicación *Cerdos para los antepasados* fue la pieza mejor documentada en ecología cultural; sus diez apéndices proporcionaban una colección de datos sin precedentes sobre el clima, la producción agrícola, la fauna y los intercambios de energía de una sociedad con su ambiente. El problema es que esos datos no están integrados al análisis de la forma en que el ritual y otras conductas simbólicas operan como mecanismos de control, sino que nada más aparecen próximos, aludidos en contigüidad. Están todas las cuantificaciones que deberían estar, y quizá hasta algunas variables se han cuantificado de más; pero falta una relación sistemática entre las islas de números, falta propiamente el sistema. El estudio no constituye entonces una demostración rigurosa, cuantitativamente fundamentada, de las causas ecofisiológicas de las respuestas conductuales humanas a sus necesidades. A pesar de su rico trasfondo de hechos, el análisis no es más que una construcción analógica en la cual las complejidades ecosistémicas, la activación de los procesos simbólicos y una impresión generalizada de causación se sugieren plausiblemente, pero no se demuestran. Rappaport sigue el protocolo de la estrategia en que se inspira, pero no realiza las operaciones de enlace sin las cuales todo lo demás es estéril. Como dice McArthur, sus demostraciones vuelven a parecerse a las propuestas funcionalistas clásicas. El mismo Rappaport, algunos años más tarde, admitiría reflexivamente las debilidades del método:

> … *Cerdos para los antepasados* constituye un intento de análisis sistémico, un análisis en el cual las unidades están claramente especificadas, se ha dado importancia objetiva a los rangos de meta y a los valores de referencia, y se identifican los mecanismos de regulación. Debe admitirse libremente que no se ajustó a los rigurosos requerimientos del análisis sistémico, y que por lo tanto es vulnerable a crítica en sus propios términos (Rappaport 1979: 68).

Se percibe que falta en esta autocrítica familiaridad con las premisas de las teorías sistémicas. Rappaport habla de un "análisis" de las variables involucradas y parece estar en busca de alguna forma de explicación; pero la cibernética está menos interesada en variables que en las relaciones funcionales entre ellas (en el sentido matemático de función) y procura determinar *qué* sucede y no *por qué* (Ashby 1972a: 24).

Mientras las autocríticas de Rappaport han sido deficientes, muchas de las críticas por parte de terceros trasuntan una doxa que se encuentra en el límite de la difamación. Uno de los ataques más virulentos contra la cibernética y la teoría de sistemas se presentó en la revista *Social Research* en un artículo titulado "La Teoría de Sistemas como Ideología", luego transformado en libro; esta diatriba del conservador Robert Lilienfeld (1975; 1978) viola una por una las reglas de una crítica responsable: define como sistémicos enfoques que a todas luces no lo son (la inteligencia artificial, la teoría de los juegos, la investigación operativa), caricaturiza con trazos groseros los lineamientos de las diversas teorías, sugiere que está en marcha una conspiración sistémico-positivista-tecnocrática para dominar el mundo,

ignora la existencia de técnicas de diagramación exitosas (como la dinámica de sistemas y el modelo forresteriano) y considera que postular objetivos tales como modelar la conducta o el pensamiento humano implica tratar a las personas o a las sociedades como si fueran fórmulas, máquinas o algoritmos. Con palpable indignación moral, afirma Lilienfeld:

> El mundo social, el mundo de la historia humana concreta, no puede ser contenido en sistemas lógicos cerrados, no importa cuan grande sea la computadora, no importa cuantas variables se construyan en el sistema… [L]a literatura [sistémica] consiste por completo en definiciones abstractas, conceptualizaciones, estructuras formales y comentarios sobre otras definiciones abstractas, conceptualizaciones y estructuras formales; en ningún lado se pueden encontrar problemas concretos, específicos y empíricos que hayan sido definidos, estudiados, o elaborados o de los que se haya podido aprender algo. Los pocos materiales empíricos que se encuentran en la literatura son sólo un pastiche de ilustraciones menores que no prueban nada (Lilienfeld 1975: 657).

Lejos de mi intención está reivindicar las apropiaciones antropológicas de las teorías de sistemas, algunas de las cuales carecen en efecto de una operacionalización satisfactoria. Pero ¿cómo sería posible tratar una realidad, según Lilienfeld, sin que medie una abstracción y sin que se establezca un límite? ¿No intentan también los enfoques humanísticos contener el mundo y la historia en una narrativa cerrada? ¿Son éstos tan satisfactorios que no sea preciso intentar comprender la realidad de otra manera? ¿No es también ideológico y autoritario prohibir que los fenómenos se aborden desde otras coordenadas? Ante tantísimas aplicaciones que han impactado en la ciencia, la tecnología y la vida cotidiana ¿puede alguien decir que una teoría sistémica como la cibernética ha sido improductiva?

Al igual que el resto de la antropología, las teorías sistémicas acusaron en los años recientes el impacto y el desafío de las posturas interpretativas, del individualismo y de un conjunto de posturas cualitativas que ocasionaron en diversos rincones de la disciplina un sensible vaciamiento metodológico. Como parte de estas transformaciones, Joan Vincent escribió un artículo para el *Annual Review of Anthropology*, titulado "Sistema y Proceso", donde analiza lo que ella entiende es un relevo de las teorías sistémicas generales por teorías procesuales de validez local. Su discusión se inscribe en una polémica más amplia, sostenida entre sistémicos emergentistas por un lado e individualistas metodológicos por el otro. Aunque no lo adviertan, estos últimos (al suponer que las propiedades del conjunto son analíticamente reducibles a las conductas de sus componentes individuales) promueven un retorno a los modelos que aquí hemos caracterizado como mecánicos, abandonando en el camino todo lo que ha podido aprenderse acerca de los efectos emergentes de las interacciones complejas. Curiosamente, su postura procesual coincide, en su búsqueda de singularidades y significados, con lo que en arqueología se considera más bien post-procesual, lo que denota una disociación radical entre las especialidades antropológicas.

Basándose en Stephen Pepper (un refinado filósofo pragmático especialista en metáfora, apreciado también por Victor Turner), dice Vincent que las teorías sistémicas y las procesuales se caracterizan por diferentes preocupaciones que se traducen en vocabularios específicos: el vocabulario sistémico incluiría las nociones de estadio, nivel, entorno, variable, evolución, disparador, retroalimentación, integración. Las metáforas procesuales equivalentes serían, en cambio, fase, campo, contexto, elemento, historia, umbral, movimiento, duración. Las correspondencias entre ambos conjuntos de conceptos (que señalan un verdadero cambio de paradigma e intereses intelectuales opuestos) se ordenarían como en la tabla 2.3. Vincent pretende que las metáforas raíces del pensamiento sistémico son las máquinas y los

organismos; las del pensamiento procesual, en cambio, son el contexto y el suceso histórico. Dado que el suceso (y en especial, el suceso de la crisis) es común a ambos pensamientos, la oposición significativa es entre suceso histórico y evento evolutivo.

Teorías Sistémicas	Teorías Procesuales
Estadio	Fase
Nivel	Campo
Entorno	Contexto
Variable	Elemento
Evolución	Historia
Disparador	Umbral
Retroalimentación	Movimiento
Integración	Duración

Tabla 2.3 – Sistema versus Proceso

No se trata, alega Vincent, de que haya un bando de sistémicos segregado de otro bando de procesualistas. Ella registra que muchos antropólogos que emplearon el pensamiento sistémico para sus datos de campo han adoptado una vena más procesual en las décadas de 1970 y 1980. Entre ellos se encuentran Brown, Orlove, Vayda, Rappaport y Geertz, quien se formó en la filas de la ecología cultural. En opinión de Vincent, la principal debilidad de la teoría ecosistémica radica en el énfasis en la integración funcional y en la auto-regulación, de modo que en ella los procesos diacrónicos se tornan problemáticos. Vincent afirma que la teoría de sistemas en el área en que mejor se desarrolló (la ecosistémica) está muerta:

> Vayda seguramente puso el último clavo en el ataúd sistémico cuando incorporó al discurso antropológico seis hallazgos biológicos: los ecosistemas no son cibernéticos; las sucesiones ecológicas no exhiben tendencias holísticas; no existe ningún "equilibrio de la naturaleza"; la evidencia de formación de patrones en comunidades biológicas es a menudo dudosa; no existe ninguna evidencia rigurosa que justifique las nociones de comunidad y de persistencia ecosistémica. El concepto de ecosistema es "un regreso contra-heurístico a la metafísica esencialista griega" (Vincent 1986: 104).

A la luz de las nuevas teorías de la complejidad, ninguno de los hallazgos biológicos de Vayda puede sostenerse; la mayor parte de esas teorías conciernen, por el contrario, a la formación de patrones en comunidades bióticas (cf. Flake 1999; Ball 2001; Camazine y otros 2003; S. Johnson 2003). Pero sea o no lícito hablar de ataúdes, la ecosistémica y la ecología cultural están seguramente en crisis; se las difunde a través de publicaciones especializadas que no llegan al común de los antropólogos, como el *Journal of Ecological Anthropology*, y por alguna razón se han tornado un campo particularmente tedioso dentro de la disciplina. Para escapar de la teleología de los sistemas cerrados en equilibrio, antropólogos ecológicos como Bates, Orlove y Vayda han vuelto su atención hacia los individuos, en un movimiento que tiende a destacar las especificidades de sus objetos de estudio, antes que sus isomorfismos con los objetos de otras disciplinas. A mediados de la década de 1970 (y es de creer que el momento no es inocente, habida cuenta del auge arrollador que experimentaba la antropología interpretativa), Vayda se convierte al individualismo metodológico, después de haber impulsado la ecosistémica la década anterior (Vayda y McKay 1975). Comienza a pensar que "el ecosistema es una entidad analítica, no una unidad biológica", que los ecosistémicos han incurrido en la "falacia ecológica" y que "las interacciones que se observan en ecosistemas complejos no requieren ser consideradas como expresión de propiedades de auto-organización de los sistemas mismos; se las puede entender, más bien, co-

mo las consecuencias de diversas y variables estrategias adaptativas de organismos individuales que viven juntos en espacios restringidos" (pp. 229 y ss.).

Vayda promueve, por lo visto, una disyuntiva cuestionable, pues en cibernética ambos conceptos (auto-organización y estrategias adaptativas) han ido siempre de la mano (Ashby 1962); el desarrollo ulterior de los autómatas celulares, los modelos de agentes y el algoritmo genético en la ciencia de la complejidad demostraría que las tácticas adaptativas de los individuos son precisamente los mecanismos del micronivel de cuya interacción resulta, a alto nivel, la auto-organización del conjunto (Bak 1966; Holland 1998). Por otra parte, no parece haber en su crítica una comprensión cabal del concepto de falacia ecológica, la cual consiste en atribuir a individuos características que son propias del nivel grupal (por ejemplo, estimar ingresos promedio por individuo a partir de ingresos regionales). La falacia ecológica es un error de inferencia que se debe a la falta de distinción entre niveles de organización; este concepto bien conocido surgió en estadística y su denominación nada tiene que ver con la ecología como disciplina, sino con nociones de grupos, agregados y poblaciones. De ningún modo implica que una estrategia ecológica sea inherentemente falaz.

Aunque el giro interpretativo representado por la profesión de fe de Vincent resultó triunfante a lo largo de la década de 1980, su trabajo clama por una contracrítica. Es inexacto que los procesualistas aprecien los fenómenos dinámicos, en tanto que los sistémicos favorecen los equilibrios y las estructuras mecánicas. El vocabulario dinámico de la cibernética es por amplio margen más rico, es también de orden procesual y se encuentra harto mejor formalizado. Menciono al azar: cambio, ciclo de estado, cinemática, diferencia, diferenciación, dinámica, duración, emergencia, entropía, estado, fase, flujo, inestabilidad, perturbación, proceso, propagación, sucesión, transformación, transiciones, trayectoria, vectores.

Los procesualistas, naturalmente, dicen ser partidarios de la dinámica; pero no han articulado un modelo al respecto, aparte de proferir periódicamente palabras-mantra tales como suceso, acontecimiento, historia o cualquier otra sugerente menos de diacronía que de singularidad. Ni campo, ni contexto, ni elemento, traídos a colación por Vincent, son ideas intrínsecamente procesuales. Las categorías restantes ni tienen una definición precisa, ni pueden mantener su semántica estable de una página a otra. Además, tanto Bateson como Nadel sabían del carácter diacrónico de la cibernética. Hasta su advenimiento, ninguna teoría había sido más sensible a los problemas de la diferencia, el cambio y la dinámica. Tomemos cualquier texto de Wiener o Ashby, concedámosle alguna atención, y comprobaremos que pocas veces antes de ellos han formulado en la práctica científica preguntas más substanciales en torno a la incidencia y al sentido del tiempo.

2.4 – La teoría general de sistemas

Aunque se ha discutido mucho su verdadera naturaleza, la teoría general de sistemas (en adelante TGS) no es rigor una teoría relativa a una serie específica de fenómenos; por el contrario, es un genuino marco general, cuya distintividad consiste en ser transdisciplinario, a diferencia de (por ejemplo) la teoría de la relatividad o la teoría sintética de la evolución que operan sólo dentro de campos restringidos (física y biología, en esos casos). No sólo la teoría es general y transdisciplinaria; también su objeto lo es, al punto que numerosos traductores prefieren traducir su nombre como "teoría de los sistemas generales": se trata de sistemas auto-organizados, independientes de la naturaleza de los elementos que los componen (de ahí su generalidad), y que pueden ser tanto físicos como biológicos, sociológicos o microsociológicos, hasta determinado umbral mínimo de complejidad.

2.4.1 – Sistemas generales

Podemos decir que la TGS constituye una elaboración consciente de teorías e ideas que estaban flotando en el ambiente (la termodinámica, la termodinámica de los sistemas abiertos, la cibernética, la teoría de juegos, la investigación operativa) y que coincidían en afirmar que las ecuaciones que describen un sistema (o a un nivel que hoy llamaríamos iconológico, los diagramas de flujo que lo denotan) son aplicables a entidades diferentes en cuanto a su composición material, leyes, funciones y fuerzas intrínsecas. El mismo diagrama de flujo se puede aplicar al termorregulador de un edificio, a la regulación del azúcar en la sangre o a la regulación (según dirá Rappaport más tarde) de los rituales en una sociedad.

Ludwig von Bertalanffy (fallecido en 1972) dice que los diversos sistemas que pueden ser descriptos mediante un mismo diagrama son isomorfos, lo cual quiere decir que es posible construir una teoría general de los sistemas caracterizables por una misma estructura formal. La TGS es, al igual que la cibernética y de las teorías que se verán después, intrínsecamente independiente de toda disciplina. El manifiesto de la TGS, establecido por la Sociedad para la Teoría General de Sistemas en 1956, propone este programa:

> Las funciones principales son: (1) investigar el isomorfismo que presenten conceptos, leyes y modelos en diferentes campos de estudio y facilitar transferencias entre un campo y otro; (2) impulsar el desarrollo de modelos teóricos en las esferas en que falten; (3) minimizar la duplicación de esfuerzos en las diferentes disciplinas; (4) promover la unidad de las ciencias mejorando la comunicación entre especialistas (Bertalanffy 1976: 14).

La teoría se concentra en aspectos de los sistemas inaccesibles a un tratamiento científico convencional: organización, jerarquía, diferenciación progresiva, competencia, elección de metas, interacción de muchas variables, crecimiento, finalidad, evolución hacia una organización superior. El requisito de la teoría es que los sistemas sean relativamente complejos (pues en entidades complejas es donde se originan los llamados emergentes), que mantengan flujos de intercambio de información y/o energía con su entorno, y que en el interior del sistema se produzcan las llamadas "interacciones fuertes". En este sentido, George Klir proporciona una simple definición de sistema, $S=(C,R)$, donde S denota el sistema como un conjunto de entidades (C) y un conjunto de relaciones (R) (Klir 1993).

Existen umbrales mínimos de complejidad a partir de los cuales los sistemas comienzan a manifestar conductas emergentes, es decir, efectos de conducta que no están linealmente re-

lacionados con sus causas aparentes. En otras palabras, la emergencia de determinadas conductas en apariencia inexplicadas o espontáneas (la aparición de la vida a partir de la sustancia inerte, la aparición del pensamiento a partir de las estructuras biológicas, la formación de comportamientos que parecen orientados a fines, la capacidad auto-organizativa de un sistema) son un efecto conjunto de la complejidad de las interacciones y de la presencia de circuitos no lineales de retroalimentación.

La epistemología subyacente a la teoría sistémica es radicalmente distinta de la epistemología mecanicista clásica. Esta última es lineal, reduccionista y sumativa. Una relación lineal asume la forma "Si P, entonces Q", lo cual presupone un nexo causal en un solo sentido, $P \rightarrow Q$. Consecuencia de esta idea es el principio de que causas similares producen efectos similares: las condiciones iniciales determinan el resultado final. La epistemología clásica utiliza procedimientos analíticos que entrañan dividir una entidad en sus partes constituyentes y en sus relaciones causales aisladas. Su modelo condicional es básicamente una ecuación que mantiene constantes todas las demás variables excepto aquella específicamente considerada. Este es el principio analítico conocido como *ceteris paribus*, que literalmente significa "si todo lo demás permanece igual".

Este tipo de reducción depende de dos condiciones: primero, las interacciones entre las partes se consideran débiles, al punto de poder despreciarse. Sólo en estas condiciones es posible desensamblar analíticamente el conjunto para luego volverlo a reunir. Segundo, las relaciones entre partes deben ser lineales para poder ser sumativas: considerando una a una las relaciones entre entidades parciales podremos arribar al comportamiento del todo. Pero incluso manifestaciones de la naturaleza o la cultura aparentemente simples no son susceptibles de analizarse según estas pautas: el análisis del oxígeno por un lado y del hidrógeno por el otro no permite predecir ni explicar las propiedades del agua; el estudio psicológico de los miembros de una sociedad no permite predecir ni explicar el régimen conductual de la cultura. Cada nivel de análisis posee propiedades específicas, irreductibles; en el paso de un nivel al siguiente aparecen características que ya en cibernética se llamaban emergentes, los que se ejemplificaban de forma parecida.

La teoría de sistemas pretende superar la incapacidad de la analítica convencional para dar cuenta del comportamiento de los sistemas complejos. Su epistemología ha conocido desarrollos bastante complicados, aunque nunca se sistematizó en un conjunto coherente, quizá por su carácter colectivo. Su comprensión cabal involucra la consideración de numerosos cuerpos de teoría: la teoría de la información, la cibernética, el análisis matemático de las funciones no lineales, etc. Sin pretender dar una visión realista, podría decirse, sintéticamente, que la TGS puede comprenderse a partir de seis conceptos centrales: totalidad, estasis, equifinalidad, multifinalidad, morfogénesis y jerarquía.

Totalidad

> Un sistema es un conjunto de componentes y de relaciones entre ellos que posee propiedades distintas a la de sus componentes tomados en forma aislada. Dado este principio, es razonable postular que no se debería nunca partir del análisis de las partes, sino del estudio de la totalidad. En consecuencia, las leyes que gobiernan el comportamiento del todo se consideran primarias: el todo es más que la suma de sus partes. La idea está históricamente relacionada con un argumento semejante propuesto hacia 1920 en la psicología de la Gestalt (Wertheimer, Köhler, Koffka). Una Gestalt es, en efecto, una configuración, una totalidad irreductible; un efecto gestáltico es una característica emergente que no sólo no puede pre-

decirse a partir de los elementos básicos de la configuración, sino que tampoco puede retrodecirse yendo analíticamente desde el conjunto a las partes que lo conforman. Un concepto alternativo es el de *holismo*, acuñado por el estadista sudafricano Jan Smuts en 1926. Existe una diferencia importante entre el concepto de totalidad en la TGS y en el funcionalismo. En éste se pone énfasis en el orden y en la cooperación entre los componentes. Para Bertalanffy, por el contrario, la competencia entre las partes y el conflicto son aspectos necesarios de los sistemas.

Cuando se considera el comportamiento de una totalidad se advierte que posee una coherencia tal que parece obedecer a un plan preestablecido. Se dice que la conducta de un sistema es teleológica, que está orientada hacia fines. Un fin es un estado hacia el cual tiende un sistema en función de su organización estructural, de las relaciones e interacciones imperantes y de su relación con su entorno. Las propiedades de estos sistemas autorregulados serían caracterizadas en las sucesivas elaboraciones de von Bertalanffy y otros pensadores que se identificaron con el paradigma: George Klir, Anatol Rapoport, Russell Ackoff, Ervin Laszlo y Kenneth Boulding. En años recientes el concepto holístico de totalidad ha sido reemplazado en las nuevas ciencias por el de emergencia de abajo hacia arriba, el cual reviste un carácter más dinámico.

Estado estable, homeostasis y morfostasis

Aunque a veces lo parezca (sobre todo en sus apropiaciones por funcionalistas en la línea de Parsons) la TGS no es una teoría de los equilibrios de un sistema, sino una vía de acceso a la comprensión de sus cambios. La serie de cambios de un sistema a lo largo del tiempo es lo que se caracteriza como su trayectoria. Tal como se ha definido en las teorías sistémicas, la trayectoria de los sistemas muestra no tanto un equilibrio sino una homeostasis; el término fue acuñado por el biólogo Walter Cannon en un libro titulado *La Sabiduría del Cuerpo* que fuera publicado en 1932. Como decía Cannon, "la palabra no implica fijeza, inmovilidad ni estancamiento: significa una condición que puede variar, pero que es relativamente constante" (1932: 24). Bertalanffy demostró que sólo dentro de los sistemas cerrados y simples se pueden dar equilibrios verdaderos. La materia inerte no está en equilibrio sino que decae. El equilibrio aparente de determinados sistemas abiertos y complejos es en realidad un estado estable [*steady state*] caracterizado por fluctuaciones débiles. El proceso mediante el cual se restablece el estado estable en medio de las fluctuaciones es lo que se conoce como homeostasis.

En caso que las fluctuaciones no puedan ser controladas por los mecanismos reguladores del sistema, se pierde momentáneamente el estado estable y el sistema evoluciona cambiando sus estructuras, en un proceso llamado *morfogénesis*, que se describe más adelante. Tras modificar su estructura, los sistemas abiertos poseen la capacidad de recuperar un nuevo estado estable después de una perturbación. La trayectoria de un sistema es una secuencia alternada de estados estables y transformaciones estructurales. Mientras que en el funcionalismo clásico el equilibrio se refiere al orden y a la cooperación entre partes, en la teoría de sistemas la homeostasis posee un aspecto dinámico, más que estático. La estabilidad es una actividad; un sistema en estado estable es capaz de responder dentro de ciertos márgenes a estímulos ambientales cambiantes. Fuera de esos márgenes el sistema se ve empujado a la restructuración. El nexo entre el concepto sistémico de homeostasis y la noción cibernética de retroalimentación es muy estrecho. Morfostasis es, etimológicamente, el mantenimiento de la forma, función, organización o estado. Los estados estables en los sistemas vivientes están controlados por circuitos de retroalimentación negativos. Un sistema viviente se autorregula porque en él los insumos no sólo afectan a los eductos, sino que estos últimos a-

fectan a los primeros. El resultado es que el sistema se adapta homeostáticamente a sus condiciones ambientales.

Equifinalidad

En la física clásica se afirmaba que condiciones similares producen efectos similares, y que por lo tanto resultados disímiles corresponden a circunstancias disímiles. Al analizar los efectos de autorregulación de los sistemas abiertos, Bertalanffy flexibilizó esta concepción introduciendo la noción de equifinalidad: en la ontogénesis es posible alcanzar un estado adulto normal siguiendo un número enorme de diferentes y complicadas rutas de desarrollo. Diversas condiciones iniciales pueden producir condiciones terminales idénticas; o, lo que es lo mismo, no se puede retrodecir cuáles son las condiciones que han generado un estado de cosas. La equifinalidad sería un caso especial del principio general de irreversibilidad. En la dinámica no lineal y las nuevas teorías de la complejidad el concepto de equifinalidad casi no se utiliza, aunque la retrodicción continúa interdicta; en el algoritmo genético el concepto está implícito (Holland 1992b: 13).

Multifinalidad

Este concepto es el inverso del anterior, y fue introducido en la teoría sistémica algo más tardíamente. El mismo establece que condiciones iniciales similares pueden llevar a estados finales diferentes; dos culturas que se desarrollan en ámbitos ecológicos muy parecidos pueden desembocar en sistemas socioculturales muy distintos. Los formuladores de la ecología cultural (entre ellos, el propio Julian Steward) conocían muy bien esta peculiaridad. El origen y la ejemplificación más convincentes de esta categoría se aplican a fenómenos biológicos. Bertalanffy fue de hecho un biólogo que pensaba haber desarrollado, gracias a este concepto, una concepción dinámica alternativa al evolucionismo. Equivocadamente, pensaba que sólo los sistemas abiertos exhibían esta propiedad. Hoy en día, particularmente en las ciencias del caos, se prefiere usar expresiones como "sensitividad a las condiciones iniciales" y "no-linealidad".

Morfogénesis

Literalmente "surgimiento de la forma". Es un concepto biológico fundamental, junto con el crecimiento y la diferenciación celular. La morfogénesis es el proceso causal complejo que amplía la desviación y que resulta en la formación de nuevas estructuras o en el cambio radical de la estructura de un sistema. Incidentalmente, digamos que la idea de morfogénesis había sido planteada y elaborada por Alan Turing (1952) en términos anticipatorios de "ruptura de la simetría", en un texto que después se convirtió en una referencia clásica de las ciencias de la complejidad. En la fase más tardía de la teoría de sistemas, en la que se revisaron todos los supuestos a instancias de las ideas de Ilya Prigogine generando lo que Magoroh Maruyama llama segunda cibernética, la clave de la trayectoria de un sistema no se encuentra tanto en las condiciones iniciales como en las redes de retroalimentación positiva que amplían la desviación. Desviaciones amplias resultan en procesos de estructuración habitualmente más complejos y por ello tendencialmente más inestables.

Jerarquía

El concepto de jerarquía presupone que los fenómenos están estructurados en niveles y en conjuntos de niveles, y que cada cual es un conjunto de otros conjuntos. Un sistema jerárquico está compuesto por subsistemas interrelacionados, hasta llegar al nivel de los subsistemas elementales. Cada subsistema está especializado y participa de maneras diferentes en

> el flujo de materia, energía o información en el interior del sistema total. La sociedad es un sistema jerárquico que comprende diversos subsistemas. Los diferentes subsistemas de un sistema disfrutan de cierto grado de libertad y autonomía.
>
> La jerarquía presupone distintos niveles de integración y organización. La premisa básica de la teoría de las jerarquías establece por un lado el isomorfismo global de los sistemas jerárquicos y por el otro la especificidad relativa de los distintos niveles. Entre un nivel y otro siempre existe una discontinuidad que no puede ser objeto de un análisis expresado en relaciones lineales de determinación. En principio, la ley general que se deriva del estudio de las jerarquías establece que no se pueden explicar linealmente los sucesos de un nivel superior en términos de los sucesos propios de los niveles inferiores (lo social a partir de lo psicológico, el pensamiento a partir de la biología), pues entre ambos planos median complejos procesos de emergencia. Cada nivel de la jerarquía está gobernado por sus propias leyes. A fines de la década de 1960 la teoría de la jerarquía de Howard Pattee, Herbert Simon, Stanley Salthe y otros se convirtió en un cuerpo teórico relativamente separado de la TGS.

Aunque en la constitución de la disciplina intervinieron muchos estudiosos, para bien o para mal la corriente lleva el sello personal de Bertalanffy, quien en su época fue saludado como una celebridad para luego caer en el olvido. Fue éste un personaje con ideas menos "liberales" que las de Norbert Wiener, ciertamente. Con una ingenuidad que el tiempo se ha encargado de acentuar, decía Bertalanffy de las orientaciones benefactoras del estado:

> Concuerda con la ética cristiana acoger incluso al más humilde de nuestros hermanos, pero ¿hasta qué punto son útiles y morales los cuidados que hoy prodigamos a los retrasados mentales, a los dementes e incluso a los criminales, si sabemos con tanta certidumbre como nos es conocido cualquier hecho científico que el resultado será el deterioro de las reservas genéticas humanas y la futura multiplicación de generaciones de idiotas y malhechores? (Bertalanffy 1974: 61).

Publicado en una de esas infaltables selecciones de textos misceláneos que dibujaban semblanzas de las inquietudes humanísticas y la sensibilidad de los grandes sabios, el razonamiento de Bertalanffy, ejemplo culminante del principio de *ceteris paribus*, ni siquiera es consistente con su propio proyecto de trascender el pensamiento lineal.

El llamamiento de von Bertalanffy en pro de la unificación de las ciencias tuvo por efecto la realización de numerosos congresos interdisciplinarios orientados a materializar esos objetivos. Aquí vamos a considerar los dos simposios más importantes que se desarrollaron alrededor de la Teoría de Sistemas en la antropología y en disciplinas afines. El primero tuvo lugar desde 1951 en adelante en forma de series de conferencias, reunidas luego por Roy Grinker bajo el título pretencioso de *Hacia una Ciencia Unificada*; participaron el antropólogo Jules Henry, Florence Kluckhohn, Lawrence Frank (el inventor del marbete "Cultura y Personalidad"), el psiquiatra Jürgen Ruesch y el sociólogo Talcott Parsons. El segundo fue un panel que se desarrolló en 1977 como una de las mesas de discusión de un encuentro mundial de antropólogos, cuyas conclusiones fueron vertidas y discutidas en un artículo publicado en *Current Anthropology* al año siguiente.

El primer simposio no fue muy memorable para las ciencias sociales, aunque algunos sistémicos de la línea dura presentaron en él ponencias de interés. La invocación de una ciencia unificada y la presencia de Talcott Parsons, pontífice del funcionalismo sociológico, alcanzó para desacreditar todo el programa. Era por lo menos la cuarta vez que se anunciaba la unificación de las ciencias: la primera, a principios de siglo, había estado asociada a los positivistas lógicos, la segunda (entre 1930 y 1950) al conductismo de Clark Hull en Yale y la

tercera (hacia 1954) a la tagmémica de Kenneth Pike, con el auspicio del Instituto Lingüístico de Verano. Con posterioridad a la sistémica, se habló también de unificar las ciencias bajo el signo de la sociobiología (la "nueva síntesis"), o de la hermenéutica geertziana, que se soñaba acaudillando nada menos que una refiguración de las ciencias sociales sobre la base de un puñado de metáforas: la cultura como texto, como drama, como campo (Geertz 1996). Como se sabe, ningún proyecto unificador funcionó. En los años del primer simposio sistémico Talcott Parsons ya no era ni la sombra del pope autocrático que había sido, y aunque su funcionalismo sociológico tenía algunos puntos en común con la teoría de sistemas, es obvio que su figura era más un indicio de continuidad, conservadurismo, aburrimiento y apego al orden establecido que de una genuina renovación epistemológica.

El segundo simposio tampoco fue triunfal. En noviembre de 1977 se realizó una discusión en un panel sobre análisis sistémicos en antropología, en el contexto de la Conferencia Mundial que tuvo lugar en Houston. El único antropólogo relativamente conocido que participó en ese panel fue su organizador, Fred Eggan; el nombre de los otros participantes no impresiona demasiado: Demitri Shimkin, Richard Blanton, Gerald Britan, Marian Lundy Dobbert, Howard Harrison, John Lowe, Karen Michaelson, Beatrice Miller y Miriam Rodin. En síntesis, y tomando este evento como ejemplar, podría decirse que nunca un antropólogo de gran renombre abrazó la teoría de sistemas, si bien unos pocos de cierta magnitud (Marvin Harris, Roy Rappaport, Gregory Bateson) se han manifestado en principio de acuerdo con ella. Como sucede a veces con los artículos del *Current*, lo más interesante fue la discusión crítica. El análisis de los comentarios y respuestas podría servir para evaluar la tibia recepción de la teoría de sistemas por parte de los antropólogos, muchos de los cuales oirían hablar por primera vez de ella a través de la desordenada caracterización de Rodin, Michaelson y Britan. No vale la pena una discusión pormenorizada. Señalo solamente que la postura que se pone de manifiesto en los comentarios oscila entre acusaciones de empleo de una jerga engañosa y métodos oscuros, y apreciaciones constructivas, como la de Randall Sengel, que sintetizan los principios fundamentales de la TGS en palabras semejantes a las que he utilizado hasta aquí.

2.4.2 – Teorías de los sistemas sociales y vivientes

A título de ejemplo de los usos característicos, en esta sección del estudio haré referencia a dos libros sumamente distintos, el primero de escala modesta y el segundo monumental, que en su momento fueron clásicos de la teoría de sistemas aplicada.

En un texto muy conocido de Walter Buckley (1970), *La Sociología y la Teoría Moderna de los Sistemas*, este sociólogo, presente en todos los simposios que se realizaron durante dos décadas alrededor de la sistémica, procura conciliar esa teoría con la tradición funcionalista de Talcott Parsons y Amitai Etzioni, sin marcar suficientemente sus contrastes y trayendo a colación bibliografía procesualista que no guarda relación con el tema. La palabra "moderna" en el mero título del trabajo delata la antigüedad de su concepción. En su bibliografía falta la contribución primaria de Prigogine y sobra la elaboración secundaria de Maruyama, y lo mismo pasa con los sociólogos verdaderamente creativos y Pitirim Sorokin. TGS, primera y segunda cibernética aparecen referidas varias veces como si fueran idénticas. En suma, el libro es ecléctico, desordenado, lleno de largas citas de autores sólo tangencialmente vinculados al proyecto. Los modelos mecánicos, organísmicos y sistémicos no se encuentran bien contrastados; por añadidura, muchas de sus caracterizaciones teoréti-

cas son imprecisas, por lo que se lo debe consultar con fuertes precauciones. Tras el desbande de la teoría de sistemas, se ha visto a Buckley rondando congresos de ciencias de la complejidad y autopoiesis, en actitud de haber estado siempre allí.

El segundo texto al que me refería, *Living Systems*, de James Grier Miller (1978), constituye el esfuerzo más notable que se ha hecho de unificar la teoría de sistemas, proveyendo una armadura sistemática a todos los niveles de análisis, desde el organismo unicelular hasta el conjunto de las naciones del planeta. Personaje influyente y carismático, inventor del término "ciencias del comportamiento", Miller (fallecido en noviembre de 2002) se hizo conocer por su propuesta de ordenamiento de los subsistemas que conforman los sistemas complejos, a los que dispuso en dos órdenes que comprenden a los subsistemas que procesan energía por un lado y a los que procesan información por el otro. Un subsistema peculiar, el reproductor, es el único que procesa a la vez información y energía. No viene al caso caracterizar cada subsistema procesador de energía (ingestor, distribuidor, convertidor, almacenador, expulsor, motor, sustentador) o de información (transductor de entrada, transductor interno, canal y red, decodificador, asociador, memoria, dedicidor, encodificador, transductor de salida). Su enumeración, por sí sola, alcanza para esbozar el cuadro.

El capítulo más importante de la enciclopedia sistémica de Miller (que abarca 1100 páginas en letra muy pequeña) es el cuarto, donde alinea hipótesis concernientes a todos los sistemas vivos. El logro y el límite de su sistémica consisten en un esfuerzo por identificar los subsistemas de cada nivel de organización, compendiando y homogeneizando la literatura disponible. El valor de esta propuesta sólo podría establecerse al cabo de un examen que considere sus aspectos integrativos y los desafíos de sus hipótesis individuales; no creo que valga la pena realizar aquí este examen, pues desde entonces su modelo no ha tenido continuidad. En general, la reacción de la antropología académica le ha sido hostil; el texto, que en algún momento se creyó que fundaba una transdisciplina específica (la Teoría de los Sistemas Vivientes), ya casi ni se menciona, salvo como ejemplo aleccionador de los excesos a los que alguna vez se llegó. El factor negativo más saliente es su insistencia en el mantenimiento de las estructuras antes que en los procesos de cambio y desequilibrio. A propósito de los emergentes, por ejemplo, escribe Miller:

> [E]s necesario ser preciso en la definición de los emergentes. Muchos autores los han discutido en términos vagos y místicos. Me opongo a cualquier conceptualización de los emergentes (como la sustentada al principio, y luego rechazada, por algunos psicólogos de la Gestalt) que involucre características inescrutables del todo, mayores que la suma de sus partes, no susceptibles a los métodos ordinarios de análisis científico (Miller 1978: 29).

Miller demuestra no haber comprendido que la razón de ser de la teoría sistémica era constituir una alternativa no reduccionista, precisamente, a los "métodos ordinarios de *análisis* científico", que más bien encarnan la mentalidad que debía superarse. Asimismo, la palabra "complejidad" apenas aparece en el denso índice temático del libro de Miller, y siempre que lo hace está más referida a agregaciones sumativas en el proceso evolutivo de organismos y sociedades que a una epistemología diseñada para tratar con ella. Lo suyo deviene entonces una versión entre mecanicista y organísmica del funcionalismo, antes que una verdadera teoría de sistemas.

Es significativo que haya sido Bertalanffy quien cuestionara más duramente esta concepción funcionalista cercana al equilibrio, vinculada a la sociología de Talcott Parsons, Robert Merton, Kingsley Davis y otros; el propio padre de la idea reconoció que el desarrollo de la

teoría de sistemas en psiquiatría y psicología tampoco "representa un desenlace emocionante de descubrimientos nuevos" (Bertalanffy 1976: 230). Conviene prestar atención a sus palabras textuales:

> La principal crítica al funcionalismo, particularmente en la versión de Parsons, es que insiste demasiado en el mantenimiento, el equilibrio, el ajuste, la homeostasia, las estructuras institucionales estables, y así sucesivamente, con el resultado de que la historia, el proceso, el cambio sociocultural, el desenvolvimiento dirigido desde adentro, etc., quedan en mala posición y aparecen, si acaso, como "desviaciones" con una connotación de valor negativa. De modo que la teoría parece ser de conservadurismo y conformismo, que defiende el "sistema" (o la megamáquina de la sociedad presente, como dice Mumford) como es, descuidando conceptualmente el cambio social y así estorbándolo. Es claro que la teoría general de los sistemas … está a salvo de esta objeción, ya que incorpora por igual mantenimiento y cambio, preservación del sistema y conflicto interno; convendrá, pues, como esqueleto lógico para una teoría social mejorada (Bertalanffy 1976: 205-206).

La TGS no estaba en realidad a salvo de la misma objeción, al punto que su tratamiento marginal del cambio y la temporalidad llevaría más tarde a una segunda cibernética, en la que los procesos y las crisis terminarían causando la bancarrota, tal vez defintiva, de los estudios estructurales. Pero esa es otra historia, a examinar más tarde.

La TGS recibe hoy mucho menos crédito que la cibernética, aunque los antropólogos que no saben mucho ni de una ni de otra sienten mayor repulsa por el concepto de mecanismo de control que por las ideas de isomorfismo. Actualmente, sólo unos pocos estudiosos de las teorías de la complejidad vinculan a éstas con la teoría general (Phelan 1999; Manson 2001). Los más viejos casi no la recuerdan y entre los más jóvenes son raros los que tomaron nota de su existencia. Una rara supervivencia de la TGS es la corriente ecléctica llamada Systems Thinking, de la que a su vez derivan el diseño evolutivo de sistemas de Béla Banathy (1996) y la muy publicitada Quinta Disciplina de Peter Senge (1990). Pero ya no se encuentran manifestaciones vivas de la TGS en estado puro, aún cuando, contra toda lógica, todavía se siga editando la publicación periódica *International Journal of General Systems* y el veterano George Klir continúe siendo su editor.

Hoy se cree que la TGS había nacido prematuramente y con excesiva *hybris*, factores que contribuyeron a su declinación (Stepp 1999); concebida para unificar todas las disciplinas, no se generalizó ni siquiera en el interior de una sola de ellas. Su uso permaneció restringido a ciertos expertos bienintencionados que tenían proyectos envolventes y unificadores; pero aunque sus programas se situaran en contra de la reducción mecanicista y la analiticidad, y manejaran con destreza un repertorio de ecuaciones complicadas, sus resultados dejaban bastante que desear. El holismo vitalista de la TGS fue reemplazado luego, en las ciencias de la complejidad, por un esquema de causas simples para efectos complejos y una idea de auto-organización "de abajo hacia arriba" (Phelan s/f; Shalizi 2001b); los diagramas de flujo y las ecuaciones diferenciales fueron sustituidos por gráficas de atractores, series temporales y ecuaciones de diferencia discretas, su difusa generalidad fue suplantada por conceptos más articulados (clases de universalidad, *scaling*, renormalización, criticalidad) y los sistemas dejaron de ser abiertos para ser nuevamente cerrados. La competencia con teorías más dinamistas, con mayores énfasis en el desequilibrio y la complejidad, con algoritmos más impactantes y con emergentes experimentalmente tratables en modelos computacionales, llevó a la TGS a una muerte tranquila, sin que nadie la llorara demasiado.

2.4.3 – Aplicaciones de la TGS en ciencias sociales

Cuando a fines de la década de 1950 comenzó a difundirse la teoría de sistemas, unos cuantos científicos sociales se entusiasmaron. Ella parecía ofrecer precisamente lo que sus ciencias no tenían: herramientas para abordar interacciones multivariadas que estaban más allá de la comprensión intuitiva o de lo que podía lograrse mediante el análisis de las partes separadas; un marco a la altura de la complejidad del objeto; una fundamentación alimentada por varias disciplinas trabajando en conjunto; y una cantidad de conceptos relativos al cambio como nunca se había visto desde los días del evolucionismo, aunque tal vez no suficiente para establecer ante la mirada del público una diferencia tajante con los modelos funcionalistas, que ya iniciaban su camino al destierro. Pese a que en torno de la TGS nunca se generó nada parecido a las legendarias conferencias Macy, un puñado de científicos sociales llegó a ser visitante asiduo de los simposios transdisciplinarios organizados por los teóricos de sistemas, más o menos integrados con la comunidad cibernética. Pero apenas corrió un poco más de tiempo para que los antropólogos, los arqueólogos y los sociólogos comprometidos con el proyecto sintieran que las promesas no se cumplían.

El primer problema con el que se encontraron consistía en la dificultad de determinar cuáles eran los sistemas; el segundo, la identificación de los mecanismos, subsistemas y jerarquías pertinentes. Las heurísticas para definir los sistemas, condición indispensable para ponerse a trabajar, no estaban formuladas con tanta nitidez como en la cibernética de Ashby, porque la TGS alentaba un modelo totalista con más de un punto en común con el principio de la caja negra. Faltando ese instrumento, no había ni siquiera objetos adecuados a los cuales aplicar la teoría. A las pretensiones de no pocos estudiosos que alegaban que cualquier entidad a estudiarse calificaba espontáneamente como sistema, se le hubiera podido responder con la vieja y sensata observación de Donald Campbell, quien pensaba que es impropio suponer que un grupo cualquiera de cosas constituye un sistema; que lo constituya o no, pensaba Campbell, es más bien una hipótesis a demostrar (Buckley 1970: 74).

De todas maneras, muchos de los principios de la TGS congeniaban con el espíritu de la época. En antropología sociocultural, Clifford Geertz (1963) y Marshall Sahlins (1964), que por aquel entonces cultivaban una ecología cultural sin personalidad, desarrollaron trabajos discursivos que sugerían un trasfondo sistémico; a decir verdad nunca pusieron las manos en el fuego por el movimiento, pero se llegó a pensar que lo miraban con simpatía (Wood y Matson 1973: 674). En arqueología utilizaron conceptos de sistemas David R. Harris, William Rathje, James Hill (1970) y Rosetta Stone. Sus prácticas combinaban ideas de la TGS con otras de la cibernética, en particular la ley de variedad requerida y los conceptos de variedad y restricciones de Ross Ashby (1972a). Los trabajos de Hill, en particular, centrados en la explicación sistémica del cambio, serían más tarde una de las fuentes de inspiración de los modelos de cultura artificial de Nicholas Gessler (1994).

Las teorías sistémicas sustentaron también parte del modelo procesual de lo que aún hoy se llama Nueva Arqueología. Esta corriente es desde hace tiempo un blanco favorito de la crítica de sus adversarios, antes que un movimiento catalizador para la disciplina. Acaso el optimismo imperante en tiempos de Lewis Binford y sus seguidores, que encontraban sistemas por todas partes porque relajaban sus criterios de delimitación, y que pensaban que los sistemas habrían de servir para "analizar" el comportamiento de sus partes constitutivas o para "explicar" sucesos en función de "leyes", testimonie mejor que ningún otro elemento de juicio las falencias de la TGS en la toma de conciencia de sus propios principios.

En un terreno más sólido y perdurable que el de esas experiencias se encuentran los estudios sistémicos de Clarke, Schiffer y Flannery. En su *Analytical archaeology*, el inglés David Clarke (1968) realizó el esfuerzo más significativo hasta la fecha de vinculación entre la TGS y la teorización arqueológica. Éste era particularmente ambicioso, ya que se proponía nada menos que re-escribir los conceptos, procedimientos y formulaciones procesuales de la arqueología desde una perspectiva sistémica, a fin de comprender la cultura material en función del sistema que ésta constituye. Clark redefinió primero los conceptos de atributos, artefactos, tipos, conjuntos, cultura, grupo cultural y tecnocomplejo conforme a ese plan; así, por ejemplo, los artefactos devinieron sistemas de atributos, los tipos sistemas de artefactos y atributos, etcétera. Luego procuró estructurar el tratamiento de cada concepto de manera que los patrones de variación implicados en la interpretación de los artefactos (o tipos, o lo que fuere) en términos conductuales no se derivaran meramente de su definición o de su existencia. En palabras que podrían haber sido de Roy Rappaport, Clarke enfatizó el papel de la cultura material como sistema de regulación ambiental y como sistema de información. Clarke subrayaba que se requiere mayor sensibilidad a la variación de los atributos de artefactos y más rigor en los conceptos que emplean los arqueólogos para definir asociaciones de artefactos; los conceptos, decía, deben ser politéticos y no monotéticos, y debe prestarse atención a la trama de relaciones anidadas y jerárquicas que median entre las diversas entidades. Una cuestión esencial, pensaba, es comprender de qué manera la variedad máxima necesaria para la supervivencia de un sistema se mantiene a niveles lo suficientemente bajos como para el sistema no se vea amenazado. La pregunta a formularse es cómo se alcanza y mantiene una situación de equilibrio, y cómo varía ese equilibrio de una sociedad a otra. Clarke no llegó a contestar esa pregunta, pues falleció a la edad de treinta y ocho años en 1976.

La segunda contribución sistémica en arqueología que todavía se estima de algún valor es la de Michael Schiffer (1972). Su principal aporte es tal vez la invitación a que los arqueólogos expandan su concepción del *contexto sistémico* en el que se produce la distribución pautada de los artefactos de manera que queden incluidos los procesos pos-deposicionales. Schiffer ha identificado algunas transformaciones que afectan la pauta de esas distribuciones; sostiene que la forma en que esas distribuciones son afectadas es cognoscible y que tal vez tenga carácter de ley. Aunque los procesos pos-deposicionales enmascaran los patrones producidos por la conducta primaria, no lo hacen de una forma drástica; siempre se podrán encontrar patrones significativos si se tienen en cuenta esos procesos transformadores. En otras palabras, hay que considerar esos procesos como parte del sistema antes que como un obstáculo para la interpretación.

La joya de la corona en el uso de la TGS en arqueología probablemente sea la propuesta de Kent Flannery (1968). Su análisis de los orígenes de la agricultura en el Nuevo Mundo demuestra la potencialidad del pensamiento sistémico más allá de sus flaquezas puntuales. En primer lugar, Flannery se opone a la idea de tratar de comprender los orígenes de la agricultura, o el cambio en general, como un proceso que involucra la adaptación de una población a su ambiente. En vez de eso sugiere que la verdadera comprensión se deberá al análisis de los sistemas de adquisición (*procurement*) que involucran la interacción de patrones de conducta y tecnología con los recursos disponibles. En lugar de considerar las prácticas de subsistencia en términos normativos, hay que concentrarse en los recursos específicos y en los patrones particulares de extracción que se instrumentan para explotarlos. En el caso de las tierras altas mesoamericanas, Flannery identifica seis sistemas de adquisición basados en el

maguey, el fruto del cactus, las legumbres arborícolas, las hierbas silvestres, el venado y el conejo. Luego Flannery plantea este dilema: si dentro de una sociedad hay tantos sistemas adquisitivos, habrá que resolver conflictos sustantivos para integrarlos. Flannery postula entonces dos mecanismos de integración: la disponibilidad estacional de los recursos y las tareas grupales, a los que describe en términos que no habré de detallar aquí. Por último Flannery desplaza su atención a la desaparición de ese sistema y su reemplazo por otro basado en la explotación de recursos domesticados. En contraste con estudios precedentes que se preguntaban cómo se descubrió o inventó la domesticación, Flannery señala la emergencia gradual de sistemas de adquisición. Basándose en el concepto de Maruyama de amplificación de las desviaciones, los cambios que identifica como "disparadores" que iniciaron el proceso son las modificaciones genéticas del maíz y los frijoles que incrementaron la productividad de esos recursos.

Fred Plog considera que al plantear las cosas de este modo, Flannery agregó más detalle e *insight* a nuestra comprensión de este episodio evolutivo. Aunque su investigación se reconoce preliminar, hoy sabemos mucho más sobre las prácticas mesoamericanas de subsistencia antes, durante y después del proceso de domesticación que si no se hubieran realizado sus estudios. Lo mismo puede decirse de sus trabajos sobre los orígenes de la civilización y el estado, que tampoco detallaré en este lugar. Cualesquiera sean las limitaciones y el carácter tentativo de las ideas de Flannery, dice Plog (1975: 214), las preguntas que formuló trasladaron nuestra atención desde las instituciones y los eventos hacia los procesos, desde la descripción de las prácticas culturales hacia el esfuerzo por comprender su evolución gradual, y desde los sucesos difíciles de definir en base a las observaciones arqueológicas hacia otros que son más sensibles a los datos de los que se dispone.

Como puede verse, el impacto de la TGS en la arqueología ha sido modesto, aunque de indudable provecho. No es fácil atribuir ni las culpas por aquello ni el mérito por esto, pues nunca hubo un proyecto sistémico puro o explícito; las ideas sistémicas se mezclaron con preocupaciones de sistematización ligadas a la disciplina y a sus objetos peculiares que hubieran estado allí de todos modos, y a esa mezcla se agregaron unos cuantos modelos de simulación y diagramas de flujo que fueron también híbridos o inespecíficos. Pero la tentativa dista de haber sido desastrosa. En una tesitura que valdría la pena contrastar con las invectivas de Lilienfeld, hace ya más de tres décadas escribía Plog:

> Los conceptos sistémicos no son varas mágicas, ni son jerga. Han sido usados para reformular problemas arqueológicos clásicos en formas que hacen que la solución eventual de esos problemas devenga más probable. Se requerirá mucho más trabajo a nivel conceptual, empírico y analítico antes que ese potencial se realice (Plog 1975: 216).

Pero aún cuando surgieran conceptos que daban impresión de diacronía y dinamicidad y se replantearan algunos problemas de maneras más sutiles o desde ángulos novedosos, estaba faltando a todas luces una teoría de la complejidad de los procesos, una algorítmica robusta, criterios formales de isomorfismos y universalidades, y una comprensión estructural del cambio. También faltaban, por supuesto, las computadoras y los instrumentos de visualización que luego habilitarían una dimensión de experiencias mucho más rica. Eso recién llegaría varios paradigmas más tarde, junto con las teorías del caos, que conciernen más a algoritmos y a capacidades emergentes bien definidas que a ambiciosas narrativas totalizadoras.

2.5 – Estructuras disipativas y cibernética tardía

> Podríamos caracerizar la actual quiebra de la sociedad industrial o de la "Segunda Ola" como una "bifurcación" civilizatoria, y el surgimiento de una sociedad nueva más diferenciada, la "Tercera Ola" como un salto hacia nuevas "estructuras disipativas" a escala mundial. Y, si aceptamos esta analogía ¿no podríamos ver el salto del newtonismo al prigoginismo de la misma manera? Mera analogía, sin duda. Pero sin embargo iluminadora.
>
> ALVIN TOFFLER

La teoría de las estructuras disipativas, la cibernética de segundo orden y la segunda cibernética han sido y siguen siendo parte de un fenómeno que involucra un cambio sustancial en las relaciones interdisciplinarias y en el manejo de la diplomacia intelectual. Mientras que los científicos sociales inclinados a la hermenéutica, los posmodernos y los estudios culturales han rechazado siempre toda inducción proveniente de las altas matemáticas y las ciencias duras, la actitud hacia el pensamiento de Prigogine y sus derivaciones autopoiéticas primero y constructivistas después ha sido de entusiasmo y de aprobación incondicional. Cuando en la década de 1980 los posmodernos se muestren también adeptos a la ciencia del caos y en la de 1990 se abalancen hacia la teoría de la complejidad, será específicamente el modelo que se origina con Prigogine el que tengan en mente.

Los prigoginianos que mediaron entre los enunciados originales de la teoría de las estructuras disipativas y las humanidades constituyen un grupo circunscripto, en el que se encuentran no pocos discípulos de Bateson, colegas de Norbert Wiener y testigos de acontecimientos asombrosos en el corazón mismo de la primera cibernética, a quienes les halaga que los consideren románticos, creativos y transgresores. Los más cercanos al núcleo han sido Heinz von Foerster, Gordon Pask, Humberto Maturana, Francisco Varela, Paul Watzlawick, Ernst von Glasersfeld, Isabelle Stengers, Rupert Riedl. Todos europeos o latinos, uno solo anglosajón, casi todos emigrantes. Otros se agregaron luego: Fritjof Capra, James Lovelock, Lynn Margulis, Paul Pangaro. En treinta años, operando como un colectivo exitoso y monolítico, con muy pocos episodios de disenso interno, han logrado articular una narrativa que, a pesar de la desconfianza posmoderna por los metarrelatos legitimantes y las fundamentaciones últimas, muchos intelectuales han hecho suya. Esa narrativa promueve ideas de complejidad, irreversibilidad, diferencia, diacronía, dinamismo, subjetividad, autonomía, indeterminación, asimetría, vitalismo, espontaneidad, creatividad, singularidad, ruptura, azar y contingencia: cualidades que los que la han abrazado consideran atributos de sus visiones del mundo, y que muchos antropólogos del gremio idiográfico reclaman para su disciplina. La historia que sigue en este capítulo es una reseña de la construcción de esa epopeya, así como un examen de sus contenidos, sus gestos arquetípicos y sus valores de verdad.

2.5.1 – Sistemas alejados del equilibrio

Si se quiere una caracterización sucinta de las diferencias entre ambas cibernéticas yo diría que la tardía difiere de la temprana por su mayor énfasis en el desequilibrio, el papel sustancial que confiere al azar y (hacia el final de su trayectoria) la pérdida de la dimensión holística, el retorno al individualismo metodológico y a la exaltación del sujeto. Esta última modulación no se encuentra en absoluto en sus escrituras iniciales, ni parece esencial para

que éstas se sostengan; pero aunque llegara más tarde y con otros protagonistas, el posibilitador de la corriente, Ilya Prigogine, no haría nada para reprimirla, aunque estuviera en conflicto con sus convicciones más profundas.

Con el tiempo, y expresándose en un lenguaje que se dirige más a los científicos sociales que a la comunidad escéptica de las ciencias duras, la nueva cibernética creerá resolver el dilema de la realidad enfatizando el rasgo de complejidad y diluyendo las sustantividades, sea de los sistemas en particular o de la realidad *tout court*. En apretada síntesis, su mensaje expresaría que si existe una realidad ella se encuentra tan subordinada al punto de vista del actor que la contempla, que es más provechoso postular que no existe, o que es el sujeto soberano quien la constituye conforme a su experiencia privada. El argumento viene como anillo al dedo para una conciencia política desalentada que busca motivos para el abandono de las utopías: si la realidad se esfuma, desaparece también, convenientemente, la necesidad de trabajar para cambiarla. Una vez que se establece el tópico de su irrealidad, no hay más nada de lo cual valga la pena hablar.

Antes que se llegara a ese extremo, lo concreto es que el modelo de Prigogine vino a llenar un vacío. El campo que va desde la dinámica no lineal a la SC se monta sobre una limitación inherente de la TGS: el margen exiguo y desganado concedido por ésta a la complejidad, o más bien el intento de poner orden a lo que se sospechaba caótico deteniendo el tiempo, consolidando el equilibrio o introduciéndolo con el nombre alterado: realimentación negativa, *steady state,* morfostasis. También hay una razón de polemicidad: las primeras manifestaciones de las teorías de la complejidad organizada ya eran demasiado controversiales para la epistemología constituida, una ortodoxia nomológica-deductivista que nunca la quiso tomar muy en serio y que ni siquiera aceptaba de buena gana a los modelos estadísticos o a la inducción (Bunge 1956: 139, 212; 1977; Nagel 1981: 333-362). Pero lo que los moderados no pueden, los radicales lo logran.

Al final de su camino hacia el constructivismo, la nueva cibernética eludirá la confrontación con la epistemología oficial labrando una ciencia separada, con sus propias reglas de juego y su propio aparato de persuación. Sus interlocutores son otros, todos humanistas, a quienes se puede inculcar que ha ocurrido una revolución paradigmática, y a quienes las discusiones que tienen lugar en las ciencias duras ni siquiera les llegan: una clientela de admiradores crédulos, compradores asiduos de libros de divulgación, candidatos óptimos para consumar una nueva alianza, literalmente. También resulta que ambas cibernéticas, la primera y la segunda (ya en vías de dar a luz una tercera), adoptan estrategias diferentes frente a la complejidad: aquella procura domesticarla, reducirla, someterla a una representación más simple; ésta, en cambio, se excita con sus vértigos, la acentúa, se erige en la voz que habla en su nombre. Este pensamiento de Gerald Weinberg, representativo de la TGS, ilustra el primer caso:

> Algunos ven la teoría general de sistemas como un peligro para este edificio [la ciencia], una regresión a las épocas oscuras del misticismo y el vitalismo. Antes de poder ahuyentar esos temores, consideraremos cómo se ha construido este edificio y por qué ha conseguido en gran medida poner orden en este mundo caótico (Weinberg 1984: 119).

La misma idea se encuentra expresada en los textos de George Klir:

> … en gran medida … buscamos sistemas simples o procuramos simplicar los sistemas existentes. Esto es, estudiamos la complejidad de los sistemas primariamente con el propósito de desarrollar métodos fundados mediante los cuales los sistemas que son incomprensibles

> o inmanejables, o que conducen a problemas intratables computacionalmente, puedan ser simplificados a un nivel aceptable de complejidad (Klir 1993: 47).

Aún sabiendo que la complejidad es dominante, y a causa de ello, Weinberg y Klir terminarán proponiendo un modelo de simplificación de la ciencia y una ciencia de la simplificación. En su momento el proyecto fue audaz, pero poco después ya no se lo percibió de ese modo. En una época en que todo lo sólido se disolvía en el aire, el azar, la complejidad y el desorden devendrían asuntos mejor vistos y desafíos preferibles. A fin de cuentas, si la opción es entre imponer una simplicidad artificial o aceptar la complejidad tal como viene ¿quién se resignaría a escoger lo primero?

Es en esta precisa inflexión que Heinz von Foerster promueve una nueva cibernética e Ilya Prigogine comienza su exploración de las estructuras disipativas, concerniente al comportamiento de los sistemas alejados del equilibrio. Aunque a veces se describe a todo este movimiento como segunda cibernética o cibernética de segundo orden, estas expresiones no se encuentran jamás en Prigogine. Si bien todos formaban parte de la misma liga itinerante y del panteón de la autopoiesis y el constructivismo, Prigogine nunca concedió espacio a las contribuciones de von Foerster (o de Maruyama, o Maturana) en sus obras mayores; sucede que en este campo hay evitaciones ostensibles: Fritjof Capra jamás menciona a Edgar Morin (y viceversa), Robert Rosen y Henri Atlan nunca nombran a Maturana o Varela, y Ervin Laszlo omite toda referencia a Capra, Jantsch, Morin, Varela, Maturana, von Foerster, Pask…

Dejando de lado las investigaciones científicas que le valieron el premio Nobel, percibo dos modalidades distintas y sucesivas en el discurso público de Prigogine. La primera, que comenzaría hacia 1960 ocupando los veinte años siguientes, tiene que ver con la caracterización de los sistemas dinámicos alejados del equilibrio, las estructuras disipativas, los procesos irreversibles y el azar. La segunda se refiere más explícitamente a la complejidad y al caos, y si bien hay un intento de sistematización de los escenarios posibles, se percibe ya que los factores primarios en juego no son los que caracterizara el autor en su primera fase, sino las problemáticas definidas por otros autores (Mandelbrot, Lorenz, Feigenbaum, Ruelle, Wolfram) en las emergentes ciencias de la complejidad y el caos: atractores extraños, dimensiones fraccionales, bifurcaciones, autómatas celulares. Invito a contrastar, a tal efecto, *Introduction to thermodynamics of irreversible processes* (Prigogine 1961) y *La nueva alianza* (Prigogine y Stengers 1983) con *Exploring complexity* (Nicolis y Prigogine 1989). En la primera fase el caos fue un confín más allá del cual no se avanzó; en la segunda, ya posee una estructura y peculiaridades universales, aunque no haya sido Prigogine quien las identificara. Dado que no fue él quien elaboró la orientación y los conceptos de la ciencia del caos, me ocuparé por el momento sólo de sus primeros modelos, que son los más representativos de esta dinámica no lineal. Indentaré la descripción de la primera modalidad (inmensamente simplificada, y sin ejemplos relativos a péndulos, moléculas, gases o reacciones químicas) para que se visualicen mejor sus contenidos y sus alcances.

> En el primer Prigogine la oposición esencial es entre la mecánica clásica, la conservación de la energía y el tiempo reversible por un lado, y la termodinámica no clásica, la disipación de la energía y el tiempo irreversible por el otro. La primera serie caracteriza a lo que él llama el paradigma de la simplicidad, con los planetas de Newton y sus trayectorias fijas como arquetipo; lo segundo es el mundo real de la complejidad, en el que el porvenir de los objetos no está determinado, donde se presentan rupturas y bifurcaciones; sus arquetipos son los seres vivientes, los sistemas físicos alejados del equilibrio e incluso la sociedad humana.

> En los sistemas muy complejos (como las sociedades), y ante la amenaza de fluctuaciones potencialmente peligrosas, se manifiesta una fuerte comunicación entre los distintos elementos del sistema que permite restablecer el equilibrio. Se dice entonces que el sistema se auto-organiza; la máxima complejidad alcanzable estaría determinada por la velocidad y eficiencia de la comunicación. La estabilidad estructural está garantizada por una organización adaptativa que sería también una función de las condiciones de contorno fluctuantes. Sucede también que los cambios e innovaciones que surgen en el interior del sistema muchas veces sobrepasan las necesidades de adaptación al medio, pues la dinámica entre el entorno y los elementos del sistema no son de simple causalidad. El mejor ejemplo de esto acaso sea el cerebro humano, el cual se formó en condiciones diferentes de las actuales.
>
> Los seres vivientes, estructuras disipativas por excelencia, violan (mientras viven) las leyes comunes de la materia. La materia de lo viviente es tan frágil, se descompone tan fácilmente, que si estuviera regida sólo por esas leyes no resistiría un solo instante a la degradación y la corrupción. El vitalismo de Stahl fue la primera filosofía que señaló esto, que tiene en la idea de estructuras disipativas su expresión teórica más rigurosa. Al caracterizar estas estructuras, Prigogine recurre a un número considerable de ejemplificaciones de sistemas físicos, químicos y vivientes con diferentes clases de comportamientos, a fin de demostrar que la complejidad, el cambio, la no linealidad y la irreversibilidad no constituyen excepciones o singularidades en el conjunto de la naturaleza, sino más bien la norma. Una norma, ciertamente, que está clamando por una ciencia nueva.
>
> Para esta ciencia nueva nada es elemental, nada es simétrico, nada se agota en una simple dualidad entre necesidad y azar; ningún principio rige por igual en todas las escalas o en todas las condiciones. Cerca del equilibrio, las leyes de las fluctuaciones son universales; lejos del equilibrio, en sistemas con cinética no lineal, esas leyes se hacen específicas, dependiendo de la no-linealidad en cuestión. En la vecindad de los puntos de bifurcación, la amplitud de las fluctuaciones pone en tela de juicio que se pueda hablar siquiera de valores medios macroscópicos o de trayectorias; el sistema además se muestra sensible a variaciones de entorno que serían despreciables en situaciones de equilibrio.
>
> Es de hacer notar que Prigogine define las características termodinámicas de las estructuras disipativas, las promueve como arquetipos centrales de la complejidad, sitúa la vida, la evolución y la humanidad en la misma serie que la totalidad de la naturaleza, describe variadas bifurcaciones, equipara caos y complejidad con aleatoriedad, y por último ejemplifica casos de surgimiento de orden a partir del caos a través de la auto-organización. Pero su modelo, al igual que la teoría de catástrofes, es en última instancia un modelo de retorno al equilibrio: las estructuras disipativas son las que se mantienen en lugar de decaer, o las que tratan de recuperar un estado estable después de reacomodarse tras una perturbación.

No es fácil encontrar en toda la obra de Prigogine una definición unívoca de las estructuras disipativas que no sea circular. Prigogine enumera algunos de sus atributos, o ejemplifica sus manifestaciones, pero nunca las define de manera consistente, así como tampoco da un nombre fijo al contexto mayor en el que las estructuras disipativas se manifiestan. Ese contexto casi nunca es un sistema, porque a Prigogine no le seduce la palabra, y cada vez que se refiere a ella lo hace en un tono levemente crítico. Él habla de situaciones, comportamientos o condiciones, antes que de sistemas (Prigogine 1997: 185). Una definición estándar (aunque expresada en términos de sistemas) no procede de él sino de Edward Lorenz, uno de los grandes teóricos del caos:

> A un sistema de dos variables en el que las áreas [de su representación] son continuamente decrecientes, o a un sistema más general en el que los volúmenes multidimensionales del espacio de fase son continuamente decrecientes, esté o no estirándose en una o, quizá, en

> varias direcciones, se lo llama sistema disipativo. Los sistemas disipativos tangibles generalmente suponen algún proceso físico amortiguador, como el rozamiento. La mayoría de los sistemas físicos son disipativos (Lorenz 1995: 51-53).

Prigogine, por su parte, a veces subraya el papel de las estructuras disipativas en el mantenimiento del equilibrio, otras en la transición hacia el no-equilibrio:

> … [C]uando nos apartamos mucho de las condiciones del no equilibrio, se originan nuevos estados en la materia. Llamo a estos casos "estructuras disipativas", porque presentan estructura y coherencia, y su mantenimiento implica una disipación de la energía. Es curioso que los mismos procesos que, en situaciones próximas al equilibrio, causan la destrucción de estructuras, en situaciones lejanas al equilibrio generan la aparición de una estructura. Las estructuras disipativas generan transiciones de fase hacia el no equilibrio (Prigogine 1997: 185).

Las apreciaciones de Prigogine sobre las situaciones alejadas del equilibrio no avalan el oscurantismo de quienes ven en ellas un límite al conocimiento y a la predicción. Él afirma, por el contrario, que los estados que pueden aparecer lejos del equilibrio tras la amplificación de una fluctuación son estables y reproducibles. Son previsibles, pero no en el sentido en que es previsible la evolución de un sistema pasivamente sometido a una ligadura externa, sino porque el número de soluciones posibles que se plantea lejos del equilibrio es calculable, y porque los estados hacia los que un sistema puede evolucionar son finitos en número (Prigogine 1997: 91). Es el principio del orden a partir del caos.

Con frecuencia Prigogine afirma que su epistemología cubre tanto fenómenos de la materia inerte como de la vida y las sociedades. Más aún, estima que el vocabulario cualitativo y expresivo de las ciencias sociales y la filosofía puede arrojar luz sobre innumerables fenómenos alejados del equilibrio que se manifiestan en las ciencias duras (Prigogine 1997: 176). Sus apreciaciones sobre las ciencias sociales, a decir verdad, trasuntan un conocimiento menos que modesto de la teoría antropológica o de la sociología. El libro de Lévi-Strauss que más estima es, por ejemplo, *Tristes trópicos*, acaso el menos representativo y el menos metódico de todo el estructuralismo (Prigogine 1998: 36). Considera también apasionantes las charlas de Lévi-Strauss con Georges Charbonnier, en especial la que presenta la distinción entre sociedades "reloj" y sociedades "máquinas de vapor", que los antropólogos en general repudian; y cree plausible la distinción levistraussiana entre modelos mecánicos y estadísticos, en términos cuya impropiedad ya he señalado (Prigogine 1997: 57; Prigogine y Stengers 1983: 182-183). Cree, por último, que es preferible la sociología imitativa de Gabriel Tarde (un modelo espiritualista opuesto al evolucionismo) a la teoría sociológica de Émile Durkheim, que después de un siglo sigue siendo una referencia capital (Prigogine 1997: 117). Aunque hay algunas alusiones a la posibilidad de conferir estatuto matemático preciso a nociones blandas de la sociología tales como oposición, repetición o adaptación, Prigogine no proporciona lineamientos precisos sobre la forma de lograrlo. Sus sucesores tampoco aportarían gran cosa al respecto. Ni aquél ni éstos entregarían a ninguna ciencia una herramienta de modelado comparable, por ejemplo, a las que brindó la teoría de catástrofes o la simulación basada en agentes.

Como he anticipado, Prigogine permaneció al margen de la gestación de la cibernética de segundo orden formulada por Heinz von Foerster en 1960 en "Cybernetics of cybernetics" (1979) y de la segunda cibernética de Magoroh Maruyama, quien acuñó a su vez el concepto de procesos mutuos causales de amplificación de las desviaciones. Heinz respondería a

su indiferencia profiriendo sarcasmos, pero sin dar nombres y sin llegar al derramamiento de sangre: "¡Ahora hablamos de sistemas disipativos, de teoría de catástrofes, del caos! Señoras y señores: por favor, no se dejen seducir por estas palabras de moda" (von Foerster 1997: 131). Y Maruyama también dispararía sus dardos:

> Observo que estudiosos eminentes están atrapados en prisiones epistemológicas. Prigogine se desespera por encontrar "el primer motor" en el Big Bang, la Teoría de Catástrofes, la disipación, la fluctuación, los puntos de bifurcación, etcétera, a pesar del hecho de que, para el pensamiento interactivo, el primer motor es un hombre de paja (Maruyama 1988).

Prigogine tampoco se ocupó nunca de la cibernética conversacional de otro humanista insigne del movimiento, el inglés Gordon Pask, apelado el *dandy* de la cibernética por el diario *The Guardian*, o *cyberneticien extraordinaire* en páginas encomiásticas de la Web. Originadas en conceptos de Ross Ashby, y en particular en la ley de variedad requerida (que vinculaba las condiciones generales de adaptabilidad de un sistema al rango de variabilidad de su entorno) y su corolario, el principio de Conant-Ashby (todo buen regulador de un sistema debe ser un modelo de ese sistema), las posturas de von Foerster y Pask otorgan estatuto central al observador. Estos desarrollos, visto por algunos como una "humanización de la cibernética", proporcionan argumentos similares a los que luego prodigarían la autopoiesis de Maturana y el constructivismo radical de Glasersfeld. Como no son teorías que arrojen una luz novedosa sobre los problemas de la complejidad o que traten de ella en forma destacada, instrumental o sistemática, las cibernéticas de von Foerster y Pask no serán tratadas en este libro.

2.5.2 – La flecha del tiempo: Críticas al modelo de Prigogine

Desde las disciplinas humanísticas la figura dominante de Ilya Prigogine se percibe como una autoridad indiscutible cuyas ideas rara vez son objeto de evaluación crítica seria. Ellas se refieren a cuestiones tan seductoras y apremiantes para nosotros (cambio, creatividad, desequilibrio) que, como decía Bertalanffy, su valor se da por descontado. Como tampoco se comprenden técnicamente sus formalismos, se concede crédito a sus reclamos discursivos confiando en que aquéllos los justifican. Pero lo cierto es que el modelo de Prigogine ha sido y está siendo reciamente cuestionado en diversas vertientes del pensamiento científico, que van desde las escuelas de física más ortodoxas hasta las ciencias del caos. Dado que la retórica de la cibernética tardía ha hecho tanto hincapié en los valores revolucionarios de su visión, celebrándola como una perspectiva desde la cual se puede poner en tela de juicio la totalidad de las epistemologías precedentes, vale la pena revisar sumariamente los reparos que se le han interpuesto.

Lo primero que se objeta a Prigogine es su falta de originalidad. Tal parece que ninguna de las ideas por las cuales se lo encomia en los textos de Edgar Morin, Fritjof Capra o Jesús Ibáñez es creación de Prigogine. El tema de la flecha del tiempo, para empezar, que es casi el símbolo de su pensamiento, ya había sido una preocupación primaria de Wiener, manifestada en las primeras páginas de *Cibernética* (1985: 56, 57). Desde ya, no puede pensarse que sea una expresión inédita: fue acuñada por el físico y cosmólogo de Cambridge Sir Arthur Eddington en 1928, y todas las consideraciones de Prigogine sobre la naturaleza dispar del pasado, el presente y el futuro se derivan de sus ideas, no siempre con el debido reconocimiento de fuentes. Norbert Wiener ya era consciente de la fuerza de la irreversibilidad del

tiempo en biología; para mayor abundancia, hizo uso de la misma metáfora varios años antes que Prigogine alcanzara celebridad:

> Ninguna ciencia se ajusta totalmente al modelo newtoniano. Las ciencias biológicas, por ejemplo, se fundamentan en fenómenos unidireccionales. El nacimiento no es exactamente el fenómeno opuesto a la muerte, ni el anabolismo –la construcción de tejidos– lo contrario al catabolismo o destrucción de los mismos. … El individuo es una flecha dirigida hacia el tiempo en una dirección y la raza humana va desde el pasado hacia el futuro (Wiener 1985: 61).

También desarrolló Wiener el vínculo entre los seres vivientes y la disipación de energía (p. 67-68), la idea de la apertura al mundo externo de los dispositivos con mecanismos de control (p. 69 y ss.), el principio de la interferencia del observador en la escala de los fenómenos cuánticos (p. 130-131), el carácter gestáltico de la percepción de patrones (p. 179-190), el concepto de organización (p. 205 ss.), los sistemas autoorganizados en los que juegan un papel esencial los fenómenos no lineales (p. 233-258) y la autocorrelación en los fenómenos de turbulencia (p. 235). Wiener estudió la auto-organización del ritmo alfa en el cerebro adelantándose cuarenta años a Francisco Varela y abordó el enigma de los osciladores acoplados medio siglo antes que surgiera la nueva ciencia compleja de la sincronización (Strogatz 2003: 40-69). Todavía más tempranamente, vislumbró una teoría del caos, usando esa expresión por primera vez en la historia (Wiener 1938). El primero en hablar de auto-organización fue sin duda Ross Ashby (1947); él fue también quien introdujo los conceptos de variedad y restricciones, en los que cabe ver un anticipo de la noción de atractores, así como la idea de los sistemas adaptativos, el estudio de la evolución de sistemas dinámicos y un concepto semejante a la clausura operacional (Ashby 1960; 1968). Muchos estudiosos de la cibernética de la primera oleada ya trabajaban en las décadas de 1940 y 1950 con modelos de redes neuronales y aprendizaje emergente, que constituyen temas recurrentes entre los discípulos de Prigogine. No parece ser vital instituir una nueva alianza cuando en la primera cibernética ya estaba lo que se requería, acompañado de una fundamentación matemática que ha resistido con dignidad el paso del tiempo (George 1969; Aspray 1993: 214, 231; Shalizi 2001b: 6-7).

En la TGS de Bertalanffy encontramos tratados, una y otra vez, conceptos y ecuaciones que hablan de auto-organización, auto-regulación y morfogénesis (Bertalanffy 1976: 26, 154-155; 1982: 91-93, 96, 120-122, 123, 132, 135, 141). La diferencia conceptual entre ambas teorías parecería tener que ver con una interpretación distinta de la morfogénesis, que en la nueva formulación no sería ya un acontecimiento fortuito, improbable y extremo, sino una latencia permanente que es indagada en sí y por sí. Hay en la cibernética posterior, es cierto, un mayor énfasis en el cambio. Pero muchos consideran que eso no justifica tratar la idea como una revolución paradigmática y el amanecer de una nueva forma de concebir la ciencia y el mundo. Bertalanffy mismo pensaba que algunas de las bases del modelo de Prigogine eran débiles y debatibles:

> En el presente no disponemos de un criterio termodinámico que defina el estado uniforme en sistemas abiertos de modo parecido a como la entropía define el equilibrio en los modelos cerrados. Se pensó por un tiempo que ofrecía tal criterio la producción mínima de entropía, enunciado conocido como "teorema de Prigogine". Si bien hay algunos biólogos que lo siguen dando por descontado … hay que destacar que el teorema de Prigogine –y el autor lo sabe muy bien– sólo es aplicable en condiciones muy restrictivas. En particular, no define el estado uniforme de sistemas de reacción química. … Una generalización más reciente del

> teorema de la producción mínima de entropía [de Glansdorff y Prigogine], que engloba consideraciones cinéticas, está aún por evaluar en lo que respecta a consecuencias (Bertalanffy 1976: 157).

Bertalanffy pone en jaque las distinciones de Prigogine entre viviente-irreversible e inorgánico-reversible señalando que "sería erróneo postular que en los organismos no ocurren reacciones reversibles o que las reacciones irreversibles no se dan en los sistemas inorgánicos" (Bertalanffy 1982: 117). Tampoco René Thom se muestra persuadido de la solidez de las posturas de Prigogine. A diferencia de Bertalanffy, está de acuerdo con Prigogine en conceder que los procesos que tienen que ver con seres vivos son irreversibles; pero subraya que se trata de una afirmación tan evidente que no cree que nadie se atreva a sostener lo contrario. Además,

> Habría mucho que discutir en cuanto a la metodología de Prigogine. Prigogine partió de la termodinámica; pero me parece que siempre que se han podido exhibir efectivamente las que Prigogine llama "estructuras disipativas" ha sido gracias a leyes específicas de la dinámica, en las cuales la termodinámica no aparece. Bajo esta perspectiva, me parece que su teoría resulta algo confusa, en cuanto a que se presenta como termodinámica en situaciones en que la termodinámica clásica no desempeña papel alguno. […] Yo creo que mi posición es más coherente: siempre he procurado presentar modelos geométricos de las situaciones límites de las dinámicas irreversibles; precisamente en la teoría de catástrofes me esforcé por dar en cualquier forma conceptualizaciones de los fenómenos irreversibles típicos, como por ejemplo el salto de un atractor a otro (Thom 1985: 41).

En una discusión directa que René Thom mantuvo con Prigogine queda clara la discrepancia de aquél con aspectos esenciales de la teoría de las estructuras disipativas, como la generalización de la idea de la irreversibilidad del tiempo. Thom le espeta:

> Quiero hacer un comentario sobre la irreversibilidad del tiempo. Estoy impresionado por la seguridad que demuestra el profesor Prigogine cuando se manifiesta sobre el carácter irreversible del tiempo, incluso, diría yo, cuando se refiere a la estructura local. Y a mí me parece que este problema de la irreversibilidad o irreversibilidad temporal en sistemas dinámicos clásicos (definido por un flujo de variedades) no es en absoluto una cuestión de tipo local. Depende de la topología del dominio que se considere, por lo que la respuesta variará según el dominio. … [S]i partimos de un flujo standard de variedades … tenemos elementos locales de flujo en los que siempre existe reversibilidad temporal. Por lo tanto, decir que el tiempo es irreversible local e intrínsecamente significa, más o menos, abandonar el modelo de los sistemas diferenciales para el determinismo (Thom en Wagensberg 1992: 209-210)

Sorprendentemente, Prigogine admitió que Thom tenía razón a ese respecto. Pero la discusión entre Prigogine y Thom no acabó allí. Aquél afirmaba que se puede descartar una descripción determinista de ciertos procesos y pensar la evolución de un sistema como efecto de una fluctuación de micro-nivel que podría haber llevado el sistema en otra dirección; de este modo, conceptos como "fluctuación", "turbulencia", "azar", "ruido" y "desorden" se conciben como ontológicamente existentes. Thom respondió, elegantemente, que esos conceptos son en rigor relativos a una descripción *epistemológica* determinada, y que no tiene sentido hablar, por ejemplo, de fluctuación, excepto en relación con la descripción de la cual se desvía. La réplica de Prigogine no estuvo por cierto a la altura de la observación.

En cuanto a la falta de originalidad de Prigogine hay más aún: la termodinámica irreversible no fue fundada por él, sino que aparece ya en la ecuación de Boltzmann en 1872, la cual no sólo maneja situaciones alejadas del equilibrio sino que es no-lineal. El primer tratamiento

formal de procesos irreversibles y alejados del equilibrio no fue tampoco obra de Prigogine en la década de 1950, sino de Lars Onsager en la década de 1920, fue publicado en 1931 en *Physical Review*, órgano de la American Physical Society, y ocasionó que Onsager ganara el premio Nobel de química de 1968 (antes que lo hiciera Prigogine) por haber iniciado la termodinámica del no-equilibrio (Prigogine y Stengers 1983: 140-141). Toda la teoría de las clases de universalidad de Leo Kadanoff (1999: 157) y de los grupos de renormalización de Ken Wilson en el estudio de transiciones de fase se originan en modelos de Onsager, antes que en ideas de Prigogine. Muchos físicos hoy en día coinciden en que las estructuras disipativas no son de uso en el estudio experimental y el análisis teórico de formación de patrones, y que los criterios alegados para predecir la estabilidad en esas estructuras siempre fallan, excepto para el caso de estados muy cercanos al equilibrio (Keizer y Fox 1974; Keizer 1997: 360-361). Cosma Shalizi, de la Universidad de Wisconsin, destaca que

> … en las quinientas páginas de su *Self-Organization in non-Equilibrium Systems* hay sólo cuatro gráficos relativos a datos del mundo real y ninguna comparación de ninguno de sus modelos con resultados de experimentación. Tampoco sus ideas sobre la irreversibilidad se conectan con las de auto-organización, excepto por el hecho de que ambas son conceptos de la física estadística (Shalizi 2001a).

Peter Coveney, en una reseña en general elogiosa de la obra de Prigogine, anota que aún cuando esté probado desde un punto de vista filosófico que la irreversibilidad debe incluirse en un nivel fundamental de la descripción, no parecen existir consecuencias nuevas, experimentalmente verificables, que hayan surgido de ese enfoque (Coveney 1988: 146). Un físico de Yale, Pierre Hohenberg (en Horgan 1995), ha dicho: "No conozco un solo fenómeno que su teoría haya explicado". Por el contrario, cada tanto alguien comprueba hechos que la contradicen, como hicieron Raissa D'Souza y Norman Margolus (1999) al encontrar auto-organización en sistemas reversibles.

Eugene Yates, editor de una importante compilación sobre sistemas auto-organizados, resume las críticas dirigidas a Prigogine por Daniel Stein y el premio Nobel Phillip Anderson expresando que estos autores no creen que la especulación sobre estructuras disipativas y la ruptura de simetría puedan, en el presente, ser relevantes a las cuestiones de los orígenes y la persistencia de la vida. Contrariando afirmaciones que pueblan libros y artículos introductorios, Stein y Anderson sospechan que no existe tal teoría, y que incluso podría suceder que estructuras semejantes a las implicadas por Prigogine, Haken y sus colaboradores no existan en absoluto (Yates 1987: 445-447). Para el célebre Murray Gell-Mann, otro premio Nobel, *enfant terrible* de la física de partículas y descubridor de los *quarks,* es falso que los seres vivos, las estructuras disipativas o lo que fuere contradigan la segunda ley de la termodinámica. Nada hay en el universo capaz de contradecirla, dice: "Quienes pretenden ver una contradicción entre la segunda ley y la evolución biológica cometen el error crucial de fijarse sólo en los organismos sin tener en cuenta el entorno" (Gell-Mann 2003: 253).

El conflicto más grave en torno a Prigogine, sin embargo, es el que concierne a su relación frente a las teorías del caos, en las que sin duda jugó algún papel inspirador, pero sin ser un promotor de visiones, un creador de conceptos o un explorador de vanguardia. Se ha desatado una ardiente polémica a raíz de la omisión de nombre de Prigogine y de su Escuela de Bruselas en buena parte de la literatura de divulgación de las ciencias del caos. Su nombre no figura en los textos más representativos del género, o aparece una sola vez en tres renglones displicentes (Casti 1995; Lewin 1999; Gleick 1987: 339 n. 308; Aubin y Dahan

2002: 322 n. 30). Ninguno de los diez mil artículos de la faraónica *Encyclopédie des Sciences* editada en 1998 por Le Livre de Poche lo nombra siquiera (Spire 2000: 17). El libro de Edward Lorenz *La esencia del caos* menciona a Prigogine una sola vez para destacar que utiliza un concepto antiguo y restrictivo del caos, pues lo identifica con la aleatoriedad; Lorenz también define los sistemas disipativos sin hacer referencia a nuestro autor (Lorenz 1995: 1, 51). En su monumental *A new kind of science*, el patriarca de los autómatas celulares Stephen Wolfram (2002: 451) no destaca ninguna contribución de Prigogine y su nombre sólo consta en una lista en letra microscópica de colaboradores de *Mathematica*. Esa biblia de la dinámica no lineal que es *Nonlinear dynamics and chaos* de Steven Strogatz (1994), libro favorito de los matemáticos, representativo de la perspectiva del MIT, habla del Brusselator y describe los mapas disipativos en términos calcados de Prigogine, pero ni aún así él es nombrado jamás. Tampoco lo nombran los textos técnicos de la especialidad que he consultado, como los de David Arrowsmith y C. M. Place (1990), Nicholas Tufillaro y otros (1990), Stephen Wiggins (1996), Paul Addison (1997), Yaneer Bar-Yam (1997), Garnett Williams (1997), Robert Hilborn (2000) o Nino Boccara (2004).

Los partidarios de Prigogine han querido ver estas omisiones como una consecuencia de los conflictos y los intereses competitivos entre el Ilya Prigogine Center for Statistical Mechanics de la Universidad de Texas en Austin y los dos centros nerviosos de la teoría del caos: Los Alamos National Laboratory Center for Nonlinear Systems (LANL) y el Santa Fe Institute (SFI). El LANL fue el feudo de Mitchell Feigenbaum y luego de John Holland; en el SFI han militado el carismático físico danés Per Bak (creador del concepto de criticalidad) y también Murray Gell-Mann, reconocido adversario de Prigogine.

Las ciencias del caos no son, por otra parte, ciencia tranquila, sino, como afirma la posmoderna Katherine Hayles (1993: 220), una corriente profundamente fisurada. Algunos críticos estiman que los libros de periodismo científico como los de James Gleick (1987), Mitchell Waldrop (1992), Roger Lewin (1999), Peter Coveney y Roger Highfield (1995) "han creado la falsa impresión de que el trabajo en los sistemas adaptativos complejos sólo comenzó en serio cuando se fundó el Instituto de Santa Fe en la década de 1980" (Heylighen 1993: 1).[4] Por eso es que David Ruelle, quien discrepa con Prigogine, ha alertado contra las afirmaciones de prioridad científica prodigadas por los periodistas norteamericanos en general y por Gleick en particular (Ruelle 1993: 120, 183).

Como sea, el tenor de los apelativos críticos que se disparan entre las escuelas es de tono subido; cuando no dejan fuera de escena, Prigogine siempre está en el medio del fuego. En páginas de la Web, Cosma Shalizi declara que planea confiar a las llamas su ejemplar de *Self-Organization* de Prigogine una vez que acabe de leerlo. Para Per Bak, el físico danés que introdujo el concepto de criticalidad auto-organizada, Prigogine usa su "intuición emi-

[4] La historia real no ha sido tan provinciana, ni comenzó siquiera en los Estados Unidos. Hoy se admite con naturalidad que una parte importante de las intuiciones que alimentaron ideas de complejidad y caos reposa en exploraciones químicas y matemáticas de la escuela rusa y ucraniana: Andronov, Anosov, Arnol'd, Belusov, Besicovich, Bogdanov, Bogolyubov, Chirikov, Kantorovich, Kolmogorov, Krylov, Landau, Lyapunov, Mel'nikov, Migdal, Moser, Neimark, Novikov, Patashinskii, Pesin, Pokrovskii, Polyakov, Pontrjagin, Rabinovich, Šarkovskii, Sinai, Šošitaĭšvili, Voronin, Vyshkind, Zhabotinskii (Wiggins 1996; Hilborn 2000: 518; Fauré y Korn 2001: 775; Aubin y Dahan 2002: 289). Prigogine no formó parte de esa escuela.

nente" en lugar de medios científicos legítimos, y lo que produce no es ciencia sino seudociencia (Bak 1997). Ron Eglash, el antropólogo responsable de la primera gran exploración disciplinar de los fractales, ha puesto también bajo sospecha el concepto de complejidad sustentado por Prigogine, un autor cuya importancia científica –afirma Eglash– está menguando a pasos agigantados. En nuestros días, y con todo lo que se sabe ahora sobre el caos, sostener la preeminencia de su obra se ha tornado técnicamente problemático.

> Las matemáticas anteriores al caos habían definido la complejidad, en la formulación de Kolmogorov, como equivalente a la aleatoriedad (la complejidad de una serie de números es igual a la longitud de su descripción más breve; dado que una serie al azar no se puede comprimir por ningún algoritmo, una serie así tiene la descripción más larga posible). Pero después del caos, la complejidad fue redefinida como computación: no hay nada computacionalmente complejo en un ruido blanco (una señal aleatoria), ni en una señal puramente periódica. Más bien son esos patrones que combinan order y azar –los fractales– lo que es computacionalmente más complejo (de hecho, la dimensión fractal puede usarse como índice de complejidad). El título de Prigogine *Order out of chaos* [*La nueva alianza*], se refería en realidad a estructuras que surgían de la aleatoriedad del ruido blanco; no se trataba de una referencia a la clase de caos descripta por los fractales de atractores extraños (Eglash s/f).

Eglash destaca que los razonamientos de Prigogine pertenecen a una era más arcaica de las ciencias de la complejidad, una concepción romántica y utópica que vislumbraba un orden algorítmicamente complejo emergiendo gloriosamente de las tinieblas. Pero la complejidad algorítmica implica, por ejemplo, que un texto más o menos largo escrito por simios dactilógrafos sería más complejo (por ser más aleatorio y por ende menos condensable) que *Finnegan's Wake* de James Joyce (Horgan 1996: 254). El contenido de información algorítmica "no es lo que suele entenderse por complejidad, ni en sentido ordinario ni en sentido más científico, … no representa una complejidad verdadera o efectiva", ratifica Gell-Mann (2003: 58). La complejidad algorítmica tiene por supuesto pleno sentido matemático, pero en las nuevas ciencias se usa hoy un concepto de complejidad más articulado que el de Prigogine y sus discípulos, con propiedades mucho más ricas que la mera numerosidad.

Hay que decir que más tarde Prigogine agregó referencias dispersas a los fractales en el libro que escribió en coautoría con Nicolis, pero éste es más tardío que *La nueva alianza.* Entre un libro y otro el autor perdió protagonismo y no participó en la gestación de la ciencia del caos propiamente dicha (cf. Nicolis y Prigogine 1989: 113-115). Su visión de la misma es además fragmentaria y sesgada. En su tratamiento de los fractales, Prigogine los adjudica a Georg Cantor, menciona sólo el conjunto epónimo y admite de mala gana que Mandelbrot tuvo la idea de bautizar a los fractales con el nombre que tienen. La misma táctica aplica con René Thom (sutil represalia), de quien omite hasta el apellido, mencionando una sola vez la teoría de catástrofes no obstante haber cubierto varias páginas con topologías en pliegue para ilustrar transiciones de fase (pp. 93-98). En una intervención en una mesa redonda sobre el azar de 1985 llamada "Enfrentándose con lo irracional", Prigogine se refiere a dimensiones fraccionales y atractores fractales, que son conceptos bien conocidos en la ciencia del caos, sin aportar una visión personal al respecto (Prigogine en Wagensberg 1992: 155-197). Ignotos *nerds* californianos bautizaron fractales y atractores con sus apellidos; no hay ninguno con el nombre de Prigogine. Tampoco hay aportes suyos de alguna entidad a los formalismos que constituyen el núcleo de las teorías de la complejidad: sistemas adaptativos, programación evolutiva, clases de universalidad, redes independientes de escala.

John Horgan, columnista habitual de *Scientific American*, refiere que los científicos familiarizados con la obra de Prigogine no tienen nada o tienen poco de bueno que decir sobre él. Lo acusan de ser arrogante y de darse autobombo. Argumentan que hizo muy pocas contribuciones a la ciencia, si es que hizo alguna; que no ha hecho más que recrear experimentos ajenos y largarse a filosofar al respecto; y que de todos los premios Nobel que se han otorgado hasta ahora él es quien menos lo ha merecido. Horgan considera que Prigogine, endiosado por sus colaboradores, abismado en su gran esquema de los misterios insondables, no ha traído al mundo más que una nueva retórica seudoespiritual (Horgan 1996: 276, 281).

Mitchell Waldrop expresa casi lo mismo al narrar la epifanía de Brian Arthur, introductor de la teoría del caos en ciencias económicas, quien descubrió que los científicos serios consideraban a Prigogine un auto-promotor insufrible que exageraba la magnitud de sus descubrimientos, llegando a persuadir a la Academia Sueca de Ciencias para que le concediera un Nobel (Waldrop 1992: 32). Los matemáticos siempre han hecho befa de las matemáticas de Prigogine, que son célebres por su falta de rigurosidad (Gustafson 2003: 11). Los críticos tampoco han pasado por alto la connivencia entre Prigogine y círculos especulativos o irracionalistas y el distanciamiento de aquél de la investigación científica sustantiva (Zuppa 2003). Esta línea de acusaciones engrana con lo que en la década de 1990 se conoció como la guerra de las ciencias, pródiga en escaramuzas de intolerancia mutua. Paul Gross y Norman Levitt, al cuestionar las lecturas presurosas de uno de los muchos estudiosos posmodernos para quienes Prigogine es fuente de inspiración, alega que el maestro se ha convertido en el héroe simbólico de una anticiencia deplorable:

> El afamado químico Ilya Prigogine está entre ellos, por supuesto (el nombre está siendo invocado en el discurso posmoderno con alarmante frecuencia); pero una mirada realista a la ciencia de Prigogine deberá enfrentar el hecho de que no ha estado produciendo contribuciones serias en las dos últimas décadas, y que se ha deslizado hacia hábitos de especulación que lo involucran en una ciencia poco firme y en matemáticas más titubeantes todavía (Gross y Levitt 1994: 96).

Nadie está obligado a trabajar hasta el último día, ni a reprimir sus impulsos hacia una especulación que pudiera ser creativa, ni a privarse de explotar el privilegio de ser una figura famosa. El problema no radica en la conducta personal de Prigogine, sino en las consecuencias para la causa científica, por cuya promoción (se supone) le fueron otorgados innumerables honores académicos. Los últimos veinticinco años de la vida de Prigogine, hasta su deceso en mayo de 2003, se consagraron a incesantes giras ceremoniales de la mano de los constructivistas, hacia quienes nunca tuvo palabras de censura que fueran más allá de unas pocas y tibias pullas, atemperadas por guiños y sobreentendidos. En conferencias colectivas y en artículos incidentales en compilaciones irracionalistas, Prigogine guardó silencio sobre la invocación indebida de su nombre en contextos ideológicos muy alejados de su filosofía. Homologó con ello una postura claustrofóbica y monotemática, que retacea valor a la ciencia y monopoliza un lugar importante en la Nueva Alianza. Es dudoso que una estrategia que ha dejado que la discusión se sitúe en semejante terreno esté a la altura de la revolución que se había augurado o promueva una pauta positiva de intercambio de ideas.

Hay infinidad de críticas a Prigogine que no puedo considerar debidamente aquí (Obcemea y Brandäs 1983; Borzeskowski y Wahsner 1984; Batterman 1991; Verstraeten 1991; Sklar 1995; Karakostas 1996; Price 1997; Edens 2001). No obstante, y aunque la contribución de Prigogine se enfrente a dudas de peso en cuanto a su generalización del principio de irreversibilidad, o por su tratamiento de los semigrupos, la ruptura de simetría u otras cuestiones

técnicas, y aunque él no haya sido el primero en traer a colación la idea de la flecha del tiempo, el caos o lo que fuere, es indudable que su modelo, en su letra y en su espíritu, instauró una nueva preocupación por la temporalidad y los sistemas complejos en el imaginario de sus lectores de las ciencias sociales. Prigogine, como ha dicho Shalizi, "intentó llevar adelante un estudio riguroso y bien fundado de la formación de patrones y de la auto-organización antes que ningún otro. Él falló, pero su intento ha sido inspirador" (Shalizi 2001a). Con justicia o sin ella, y aunque la ciencia entera se alce en su contra, esas problemáticas estarán, al menos por un tiempo, vinculadas a su nombre.

2.5.3 – Autopoiesis y Enacción: Maturana y Varela

El tratamiento que se dará en este libro a la autopoiesis, la enacción, el constructivismo y la investigación social de segundo orden será diferente del que se ha dado a otras estrategias. Aquellas corrientes se han movido fuera del ámbito de las teorías de la complejidad en sentido estricto, alejándose de las temáticas que dieron origen a sus propias búsquedas, como habrá de verse. No interesa entonces enseñar aquí el contenido puntual de sus propuestas, pues las entidades a las que se refieren no son bajo ningún aspecto sistemas dinámicos no lineales, ni sus modelos son modelos del cambio, ni las teorías que desarrollaron son teorías de la complejidad, por más que sus discursos sean de un grado tal de complicación que muchos han llegado a creer que sí lo han sido.

Dado que la autopoiesis y sus secuelas no son doctrinas que pongan en foco las materias que aquí se tratan, habrá que dar alguna excusa por su inclusión en este libro. Los elementos de juicio que he considerado son los que siguen.

(a) Autopoiesis y enacción son derivaciones lejanas de la ecología de la mente de Bateson (uno de sus innumerables sitios en la Web se llama *Ecology of Mind*). Sus practicantes tuvieron con ese antropólogo una relación intelectual y personal directa, lo mismo que con Ilya Prigogine, autor poco referido en sus textos primarios.

(b) Uno de los fundadores de la autopoiesis, Francisco Varela, ha negado reiteradamente que la autopoiesis sea un concepto adecuado para estudiar el orden social, pues las características de este orden nada tienen que ver con las condiciones requeridas para que una entidad sea autopoiética. Sólo los seres vivientes serían entidades de esa categoría. Habrá que revisar entonces la problematicidad de la extrapolación de conceptos autopoiéticos hacia las ciencias sociales.

(c) La autopoiesis no es tampoco una dinámica, sino en el mejor de los casos una teoría de la homeostasis o el estado estable de entidades que son más máquinas que sistemas; el "mundo privado" de las máquinas autopoiéticas se basa en el mantenimiento de su propio equilibrio e identidad. Por su estructura y sus procesos, esas máquinas son no complejas, conforme a las tipologías aceptadas (Langton 1991; Wolfram 2002); no está probado que los modelos de esas máquinas posean capacidad de computación universal o reproducción, ni está deslindada su posición en la jerarquía de Chomsky, ni se han determinado las clases de universalidad que les son propias.

(d) Este último concepto merece un tratamiento detenido. Las teorías de la complejidad, desde la cibernética y la TGS hasta las ciencias del caos, son generales y abstractas; ninguna de ellas se aplica sólo a la materia física, a la vida, a la sociedad o a un género particular de objetos. Un concepto fundamental en esas teorías es el de clases de universalidad, una idea surgida en mecánica estadística y en teoría de campo. Conociendo las clases de universali-

dad para un tipo de modelo se pueden hacer afirmaciones sobre ellos sin tener en cuenta los detalles de su naturaleza material, su estatuto ontológico o las disciplinas cerradas que los estudian; en lugar de buscar una solución para cada problema, lo que uno hace es buscar entre las clases de problemas aquéllas que admiten una solución común (Kadanoff 1999). Sin clases de universalidad o un principio de isomorfismo equivalente la transdisciplinariedad no es ni necesaria ni posible, salvo como intercambio informal de metáforas. No hay dichas clases en autopoiesis, pues ella por un lado presupone especificidad ontológica (rige para los seres vivientes), y por el otro no ha definido los parámetros y los rangos críticos que darían sentido a la extrapolación del concepto a otros órdenes de fenómenos; la autopoiesis sería no-universal en este sentido, y es por tanto anómala como teoría de la complejidad.

(e) A pesar de lo anterior, en la larga lista de libros y artículos que han tratado el asunto en el campo discursivo no faltan autores que sindiquen la autopoiesis como teoría de la complejidad, ya sea porque sus responsables han tenido contacto personal con promotores de esas áreas, o porque uno de ellos acostumbraba recurrir a sistemas complejos, en particular autómatas celulares y redes neuronales, como forma de ilustración de sus ideas. Pero a despecho del esmerado aparato de citas auto-referentes y de insinuaciones experimentales, Varela no ha realizado ninguna contribución sustancial a ese campo (cf. Varela 1990: 85, 103; Varela, Thompson y Rosch 1992: 179, 184). Cualquiera sea su valor en otros respectos, la autopoiesis no ha jugado papel alguno en el desarrollo algorítmico o computacional en redes neuronales, dinámica no lineal, programación evolutiva, autómatas celulares, agentes autónomos, vida artificial y demás sistemas complejos. No existen instrumentos informáticos que les sean característicos, ni la complejidad como asunto teórico ha sido jamás tratada en su literatura primaria.

(f) Nunca se ha elaborado una crítica rigurosa y metódica de los argumentos autopoiéticos, aunque han habido algunas tentativas parciales (Kampis y Csanyi 1985; Zolo 1986; 1990; Cottone 1989; Mingers 1990; Birch 1991; Johnson 1991; 1993; Swenson 1992; Pérez Soto 1994; Gallardo 1997; Biggiero 1998; Boden 2000; Collier 2002; Nespolo 2003). Las ideas autopoiéticas se diseminan en su propio nicho sin encontrar obstáculos reflexivos, o son adoptadas como si no fueran problemáticas por quienes encuentran razonable que se postule un lenguaje sin estructuras ni niveles de articulación, una cadena de "emergencias" sin sustento experimental, un conocimiento sin símbolos, una biología sin reproducción, una interacción sin códigos comunicativos y una mente que no está en el cerebro. El estudio que sigue no pretende dar cuenta de los contenidos propios del movimiento, ni realizar una crítica a fondo; me conformo con establecer unos pocos elementos de juicio, para proceder a su examen en un momento más oportuno.

Humberto Maturana intentó analizar la forma en que los procesos biológicos dan lugar a los fenómenos del pensamiento, la cognición y el lenguaje. En el laboratorio de computación biológica de la Universidad de Illinois recibió durante algunos años la influencia de las teorías cibernéticas sui generis de Heinz von Foerster y Gordon Pask, al lado de la filosofía de Heidegger. En ese ambiente, Pask exploró antes que Maturana las condiciones de la autoorganización para el aprendizaje, el significado de la recursividad, las condiciones de la conversación y el lenguaje, y sus relaciones con la cognición (Pask 1975; 1993). Maturana es, como Bertalanffy, un biólogo de profesión, más concretamente un neurofisiólogo. Sus primeros trabajos importantes se realizaron en colaboración con Warren McCulloch y Walter Pitts, quienes sentarían las bases sobre las que luego se desarrollaría el paradigma computacional de las redes neuronales o conexionismo, uno de los contendientes en el debate de la Inteligencia Artificial (Graubard 1993; Franklin 1997; Devlin 1997). Debo puntualizar

que Maturana (a diferencia de Varela) se separó tempranamente de los desarrollos sobre redes neuronales, respecto de los cuales se manifestó escéptico, aduciendo que las computadoras son sistemas alo-referidos (en vez de auto-referidos) y que "no hay necesidad de imitar lo que sucede en nuestro cerebro" (Maturana 1996: 325).

En un principio las investigaciones de Maturana tenían que ver con los complejos patrones de actividad entre neuronas que, según él, ocasionan hechos perceptivos, casi independientemente de los factores ambientales de estímulo (luz, longitud de onda). Maturana propuso entonces estudiar la percepción desde dentro, más que desde fuera, concentrándose en las propiedades del sistema nervioso como generador activo de fenómenos, más que como filtro o espejo de la realidad exterior. Con el tiempo iría construyendo un cuerpo de teoría concerniente a la dinámica de la vida, cuya pregunta esencial es "¿Cuál es la organización característica de los seres vivos?".

La respuesta dada por Maturana a esa pregunta es que el conjunto de los sistemas de los seres vivientes más que constructivo es auto-constructivo. El concepto principal del esquema de Maturana es el de *autopoiesis,* propiedad no tanto de sistemas como de "máquinas", una metáfora que remite a la primera cibernética pero que tiene también cierta resonancia de rhizomática deleuziana. Cada tanto uno se cruza con comentarios en el sentido de que Gilles Deleuze y Felix Guattari tomaron de Maturana y Varela la metáfora de las máquinas; pero *El Anti-Edipo* es por lo menos dos años anterior a la presentación en público de la autopoiesis, y sus máquinas del deseo, despóticas o territoriales se inscriben en una larga genealogía de metáforas maquinales que se remonta a las máquinas célibes de Michel Carrouges de 1954 y a las megamáquinas de Lewis Mumford de 1966.

Autopoiesis significa algo así como auto-producción, o auto-creación. Aquí va la enrevesada definición, citada tantas veces: una máquina autopoiética es una red de procesos de producción de componentes (transformación y destrucción) que a través de interacciones y transformaciones regenera y realiza la propia red de procesos y relaciones, que constituyen a la entidad como una unidad concreta, especificando el dominio topológico de su realización como tal (Maturana y Varela 1980: 78-79). Las unidades de una máquina autopoiética deben tener límites identificables y deben constituir un sistema mecánico con relaciones necesarias entre componentes.

A poco de razonar en esta tesitura, Maturana terminará precipitándose en lo inevitable: no es el estímulo lo que determina la conducta, sino el ser viviente quien define su entorno y su experiencia. Allí afuera, dice, no hace ni frío ni calor, ni hay colores, ni ruido, ni luz; no hay ningún flujo de información entre el entorno y el ser vivo, sino que es éste quien establece cuáles diferencias o perturbaciones son significativas conforme a su estructura individual (Maturana y Varela 2003: 10). El razonamiento se asemeja parcialmente al concepto batesoniano de la "diferencia que hace una diferencia", presentado en una conferencia de homenaje a Korzybski en 1970, así como a la bien conocida ley de Weber-Fechner, luego reformulada en consonancia con la ley de potencia por Stanley Stevens; pero Maturana nunca reconoció estas similitudes, pues lo que Bateson definía de ese modo era la información, mientras que la ley perceptual de Fechner-Stevens tiene un robusto sustento de laboratorio y está más imaginativamente cuantificada que cualquier argumentación autopoiética (Stevens 1957; Bateson 1972: 286). Ambos desarrollos, por otra parte, desmienten a la autopoiesis en un punto crítico: las constancias perceptivas observadas no son dependientes ni de los sujetos, ni de sus dominios consensuales; valen para todos los ejemplares y todas las

culturas. El propio Francisco Varela, tras distanciarse en malos términos de Maturana, reconoció que la fundamentación de la idea autopoiética de perturbación era insatisfactoria, conducía sin remedio al solipsismo y no permitía tratar la evolución y el cambio (Marks-Tawlor y Martínez 2001: 4; Varela 2004: 52, 56).

Volviendo a Maturana, uno de los objetivos que él persigue es el de explicar el surgimiento de la cognición. Este conocimiento, dice, no se puede comprender a través de la forma en que opera el sistema nervioso; es necesario investigar el modo en que las actividades cognitivas son comunes a todas las especies, lo cual está determinado por el fenómeno de la autopoiesis. La vida como proceso es un proceso cognitivo, tenga o no el ser viviente un sistema nervioso. Una explicación cognitiva trata acerca de la relevancia de la acción para el mantenimiento de la autopoiesis. El dominio cognitivo es temporal e histórico: cuando decimos que "un animal sabe X", ésta no es una afirmación sobre el estado del animal sino sobre un patrón o esquema de acciones, pasadas, presentes y proyectadas hacia el futuro. La epistemología de Maturana se opone en consecuencia al conductismo, en el cual se concibe el comportamiento de un individuo como secuencia de reacciones ante las coacciones del ambiente. No se pueden identificar estímulos que existan independientemente del organismo; por el contrario, es éste el que especifica el espacio en el que vive. Buscando retener la autonomía de los seres vivos como estrategia central, Maturana rechazó la enumeración de factores que definen la vida y evitó el uso de conceptos referenciales como "propósito" y "función". En su lugar pone un "conocimiento" genérico, para el cual no habría diferencia dignas de nota entre una respuesta instintiva, un movimiento reflejo y un sistema filosófico elaborado.

Pronto las especulaciones de Maturana comienzan a elevarse por encima de lo que alguna vez pudo sustentar experimentalmente (su ámbito de experimentación, de hecho, se restringe a las retinas de las ranas), hasta tocar lo sociocultural. Así como el individuo interactúa con un ambiente no intencional, dice Maturana, también lo hace con otros semejantes. Esto genera patrones ligados de conducta que conforman un dominio consensual, continuamente regenerado por las demandas de autopoiesis de cada interactor. Las propiedades fundamentales de un dominio consensual son las de ser al mismo tiempo arbitrarias y contextuales. La conducta en un dominio consensual se llama conducta lingüística, y los patrones cambiantes de estructuras constituyen un lenguaje. El rasgo central de la existencia humana es su ocurrencia en un dominio consensual, un dominio que existe para una comunidad societaria. El conocimiento que constituye ese dominio no es objetivo, pero tampoco es subjetivo o individual:

> Las diferencias culturales no representan diferentes modos de tratar la misma realidad objetiva, sino dominios cognitivos legítimamente distintos. Hombres culturalmente diferentes viven en diferentes realidades cognitivas recursivamente especificadas a través de su vida en ellas (Maturana 1974: 464).

En un primer momento, entonces, no se requiere para la cognición ni siquiera un sistema nervioso; en una segunda instancia, en cambio, la cognición se define como función de una cultura, entendida a la manera idealista-particularista de Sapir-Whorf-Pike, aunque la autopoiesis presuma de determinismo y requiera algún grado de universalidad para constituirse como una teoría general. Por aquí anidan varias inconstancias y las ideas cambian bruscamente según el tema del simposio, la moda de la época, la sagacidad del periodista que interroga o el título de la compilación, pero ¿qué antropólogo compraría la idea si la cultura

fuese excluida? Maturana, de hecho, escribe para las ciencias blandas, pues ni remotamente es en las ciencias duras donde estas ideas podrían tener algún impacto.

Maturana se ocupó de otras temáticas, pero todas descansan en la misma clase de esquema: una matriz constructivista en las que la espontaneidad y las capacidades transformacionales del sujeto (pues sus seres vivientes y organismos no son sino símbolos sustitutos de la subjetividad) remiten a un catecismo intensamente individualista, que en su celebración de la iniciativa y autonomía de las máquinas autopoiéticas ni siquiera ha previsto un lugar para la herencia biológica, ni tiene forma de distinguir entre lo innato y lo adquirido, pues ambas instancias son casos experienciales que la teoría define de la misma manera (Maturana 2004: 21-22). Es esta una visión en la cual, sin dejar de reconocer el hecho obvio de que las personas están inmersas en un medio social, cada cual encuentra, como Horatio Alger, la forma de hacerse a sí misma.

También forma parte esencial de esta visión la idea de que rasgos tales como conocimiento y creencia surgen en el dominio del observador, y no son cosas que se encuentren "en" o "dentro" de los sistemas. Su consigna culminante afirma que "todo lo que es dicho, es dicho por un observador" (Maturana y Varela 1980: xix): una aseveración que tiene el tono aforístico de las ideas profundas, y en la que algunos se empeñan en encontrar sabiduría, pero que o bien tiene serias consecuencias epistémicas y ensombrece su propio punto de vista, o no las tiene en absoluto y deviene entonces una trivialidad abismal (Johnson 1993; Mingers 1994: 112). Como fuere, se trata de una tesis que no se lleva nada bien con otras igualmente totalizadoras a las que también se suscribe ("no hay nada fuera del lenguaje", "no hay nada fuera de la mente"), ni con el hecho de que todas las máquinas de una misma especie perciben las mismas clases de diferencias, ni con la descomunal pretensión de haber desentrañado nada menos que la clave de lo viviente, la evolución, el origen del pensamiento, el lenguaje, la mente, la conciencia y la cultura (Maturana 1996: 92). Si la ciencia no puede, según él afirma, decir nada sobre la realidad, habría que preguntarse cómo hizo él para no dejar ninguna de sus claves sin elucidar.

De las teorías sistémicas primigenias ha quedado un leve perfume, soterrado bajo la apoteosis no ya de la totalidad del sistema sino de la individualidad del sujeto, por más que se diga que se han tomado en cuenta las interacciones; lo más dudoso de todo este esquema es, sin duda, la pretensión de que sería de aplicación a todo lo viviente. Pienso que esa generalidad es espuria: en todo momento la categorización es emblemática de una ideología subjetivista que a las pocas páginas torna previsible todo que lo Maturana tiene que decir sobre el hombre, la sociedad y la cultura. La demostración de lo que yo le imputo se encarnará en la corriente que adopta estos axiomas y saca de ellos la única conclusión posible: la concepción pre-cartesiana de Maturana servirá de pie al constructivismo radical, que constituye la fase siguiente, desde donde se proclama ya no que la realidad es relativa al punto de vista de sujetos y sociedades, sino que es fundamentalmente inventada (Watzlawick y otros 1988; Maturana 1996).

A veinte años de iniciado el momento reflexivo de las ciencias sociales, algunos autores afines al movimiento autopoiético están percibiendo que la distinción entre observadores y observados no introduce ninguna novedad respecto de la diferenciación entre sujeto y objeto alentada por el positivismo; lo único que hay de nuevo es un cambio de nombres, al lado de un señalamiento (carente de consecuencias epistemológicas efectivas) de que los observadores son a su vez máquinas autopoiéticas, lo cual es desde todo punto de vista una ob-

viedad (Palmer 1998: 4). La autopoiesis desarrolla asimismo el tratamiento de los sistemas observados en tercera persona, conforme a la pauta del autor omnisciente propia del *free indirect speech*, la forma narrativa más convencional de las ciencias sociales en general y del realismo etnográfico en particular; por tal motivo se cree ahora que la teoría en cuestión "no proporciona una fenomenología de prehensión interior, sino de cognición externa … y, por las mismas razones, no puede dar cuenta de una intersubjetividad en plenitud" (Wilber 2005).

Muchos de los conceptos de Maturana están interrelacionados, pero de maneras desprolijas, cambiantes, contradictorias. Las máquinas autopoiéticas se caracterizan por su clausura operacional (vale decir, son autónomas), pero se relacionan con el exterior mediante acoplamiento estructural (o sea, no lo son tanto); están además delimitadas por una membrana, lo que excluiría de la definición de "ser viviente" a todos los vegetales que se reproducen por gajos, las colonias, la simbiogénesis, los virus, las esponjas, los líquenes, el moho del fango, los cangrejos ermitaños, un porcentaje importante de organismos inferiores y las sociedades, pero de alguna manera incluiría el fuego y las soluciones autocatalíticas (Morales 1998; Rosen 2000: 275-276; Boden 2000: 130). Según convenga a sus razonamientos, Maturana sitúa el punto crítico ya sea a nivel de la totalidad de lo viviente o del individuo, sin que exista razón formal para semejante volubilidad; de este modo, las actividades cognitivas son comunes a todas las especies, mientras que la percepción de los factores ambientales se define a nivel de la experiencia individual. Respecto de las relaciones con el exterior prodiga afirmaciones que hablan de una autonomía casi absoluta (Maturana y Varela 2003: 84), al lado de otras que expresan que los seres no son ajenos al mundo en el cual viven (p. 87, 114). Por un lado nos dice que el interior y el exterior de un organismo sólo existen para la mirada de quien observa (Maturana 1978: 41, 46; Varela 1979: 243); por el otro, afirma que es el sistema autopoiético el que realiza sus propios límites y que éstos son producto de sus operaciones, y no resultados de las definiciones del observador (Maturana 1975: 317; Maturana y Varela 1980: 81); la teoría establece primero que no hay un lenguaje observacional capaz de hablar sobre los estados internos de las criaturas, pero luego habla sin tapujos de la conciencia y los sentimientos, y hasta patrocina un cálculo de la auto-referencia. Mientras que la imagen favorita de Maturana para ilustrar sus propias ideas es la de las manos de Escher que se dibujan mutuamente (Maturana y Varela 2003: 11), yo diría que un icono más apto sería el de un codo borrando lo que la mano escribe.

En cuanto a las capacidades, factores y acontecimientos de los que la teoría no puede dar cuenta (desarrollo, reproducción, biogénesis, especiación, información, comunicación, código genético, suicidio, altruismo) Maturana se las saca de encima estimándolas no constitutivas de lo viviente (p. 38). El cambio estructural y por ende la deriva evolutiva están expresamente excluidos como problemas (Varela 2004: 47). Siendo su modelo biológico incapaz de considerar la reproducción y los códigos implicados en ella como constitutivos, no es de extrañar que la biología científica haya descartado la autopoiesis como modelo viable (Brockman 2000; Luisi 2003).

Inmediatamente allegado a Humberto Maturana, Francisco Varela continúa y expande estas ideas en la generación más joven, con mejor fortuna fuera que dentro de los Estados Unidos hasta su fallecimiento en mayo de 2001. Sus nuevos modelos, sesgados hacia la cognición, promocionaron en sus últimos años un enésimo candidato a encabezar las modas conceptuales que lleva el nombre de enacción y que no habré de tratar en estas páginas. En ellos

Varela ha estado trazando una narrativa agonística de las epistemologías, una historia de emergentistas nobles y cognitivistas perversos, congregados estos últimos en torno del Instituto de Tecnología de Massachusetts, Noam Chomsky y el proyecto de la línea dura de la inteligencia artificial, representante a su vez de "la ortodoxia de la comunidad científica" (Varela 1990: 15-16). La argumentación de Varela remite siempre (copiando capítulos enteros de un libro a otro, aunque el texto de destino sea de autoría compartida) a una historia conspirativa en la que hay una primera etapa de creación coincidente con la vieja cibernética; luego viene un segundo momento en el que el imperio contraataca, y los positivistas del movimiento cognitivo toman el poder, acaparan los subsidios y usurpan el papel de Dios pretendiendo que las máquinas suplanten al Hombre; le sigue una tercera fase en la cual el conexionismo consuma su revancha; y todo acaba con un apogeo de final abierto pero feliz, donde la enacción, su propia idea, supera y culmina todas las epistemologías de Occidente. Varela no conoce términos medios para referirse a las doctrinas que ama y a las que aborrece: el modelo simbólico de procesamiento de información le parece a él "una forma muy dogmática de ciencia cognitiva", que en una actitud de "extremo parroquialismo" "ha ignorado soberanamente" las "valiosas contribuciones" del Biological Computer Laboratory de von Foerster, a quien llama "Heinz el Grande", "figura memorable" y "absolutamente extraordinaria"; Marvin Minsky, mientras tanto, es para él "un grano en el culo, un arrogante hijo de perra" (Varela 1995; Brokman 2000: 154).

Por otra parte, las afirmaciones de Varela respecto de los sistemas complejos adaptativos son derivativas y casi siempre erróneas, a fuerza de combinar y yuxtaponer atributos de distintos tipos de criaturas tecnológicas: en su caracterización de la vecindad de los autómatas celulares, por ejemplo, Varela asevera que cada unidad se entiende con dos vecinos, confunde las particularidades de redes booleanas con la de los autómatas celulares unidimensionales, recomienda el libro *Chaos* de James Gleick como bibliografía adicional sobre sistemas emergentes, caracteriza el comportamiento temporal de los agentes como una dimensión que involucra una especie de memoria histórica, y enseña que las celdas de los autómatas denotan neuronas (Varela 1990: 53-76; Varela, Thompson y Rosch 1992: 111-120).

¿Es necesario señalar que todo es inexacto? Como se verá más adelante, en los autómatas celulares las vecindades no son necesariamente duales; la vecindad mínima no comprende el estado de dos elementos sino el de tres; en las redes booleanas las conexiones (que no son vecindades) se establecen no entre celdas adyacentes sino entre agentes disjuntos; el libro de Gleick (que glorifica al SFI) no dice una sola palabra sobre autómatas, redes booleanas, conexionismo, sistemas adaptativos, cognición o emergencia; los modelos conexionistas difieren mucho de los sistemas emergentes canónicos, tanto en su propósito como en su implementación; las celdas y agentes de los sistemas adaptativos no reaccionan conforme a su experiencia fenomenológica de vida sino, más humildemente, en función de su estado actual, como buenos autómatas finitos sin memoria cuyas trayectorias son formalmente imposibles de remontar hacia atrás; y las celdas de los autómatas celulares no denotan neuronas sino cualquier cosa que se quiera que representen.

Para cualquier conocedor con ejercicio en la materia resulta evidente que está faltando aquí una experiencia de primera mano, por más que los textos prodiguen alusiones experimentales, como cuando Varela reproduce ilustraciones bien conocidas de Stephen Wolfram pretendiendo que luzcan como resultados de experimentos suyos (Varela 1990: 66; Varela, Thompson y Rosch 1992: 117-118, 179, 184). Lo concreto es que Varela ni siquiera explica

(en un contexto en el cual sería definitorio hacerlo) qué significan las reglas binarias de tipo 01111000, 11100110, etc, que trae a colación como si su significado fuera transparente; tampoco especifica cuál es la estructura y rango de vecindad de su presunto autómata Bittorio (pp. 178-185), una entidad reseñada en páginas atestadas de incorrecciones, cuya "conducta enactiva" celular (también descripta lacunarmente) ha sido copiada de trabajos publicados por Wolfram (1983; 1984; 1994), antes que tomadas de las experiencias de Varela en algún laboratorio real[5].

Varela reprueba las ideas de procesamiento de información, la programación lógica-simbólica, la perspectiva computacional del MIT, el conductismo y el modelo cognitivo representacional. Por eso debe mantener bajo sordina que los sistemas complejos adaptativos y las redes neuronales son mecanismos de procesamiento de información simbólica, que sus capacidades de computación se vinculan con las funciones booleanas en tanto operadores lógicos, que los programas que usa el mismo Varela compilan merced a las distinciones chomskyanas sobre los lenguajes formales y sus aceptadores (desarrolladas en el MIT), que el celebrado aprendizaje hebbiano de las redes neuronales es explícitamente conductista y que el proyecto conexionista reciente degeneró en modalidades de procesamiento simbólico. En la actualidad el conexionismo eliminativo que promueve Varela compite en minoría con dos movimientos rotundamente cognitivos: el conexionismo implementacional (o subsimbólico) y el conexionismo revisionista de procesamiento de símbolos, sucesor del PDP (*parallel distributed processing*), o escuela de San Diego (Hebb 1949; Pinker y Prince 1988; Franklin 1997: 139). Además hoy en día está claro (y probado) que "ninguna máquina puede reconocer X a menos que posea, por lo menos potencialmente, algún esquema para *representar* X" (Minsky y Papert 1969: xiii).

Las relaciones de Varela con el modelado computacional nunca han sido afortunadas. Varela, Maturana y Uribe (1974) habían presentado un algoritmo autopoiético que supuestamente daba cuenta del mínimo modelo químico necesario para sostener de la vida y confería al modelo de la autopoiesis una robusta fundamentación. Conjeturo que el algoritmo, similar al Juego de la Vida de John Conway, fue programado por Ricardo Uribe, dado que Maturana se opuso siempre a la simulación y Varela nunca demostró en sus trabajos en solitario que dominara la técnica requerida para suministrar aunque más no fuese una descripción aceptable de un mecanismo informático. Pese a que el algoritmo autopoiético fue un intento relativamente temprano de modelado computacional, nunca pudo ser implementado por nadie; las experiencias internas del movimiento autopoiético, como las de Milan Zeleny (1977; 1978), tampoco fueron documentadas de manera que alguien más pudiera replicar los hallazgos según la práctica académica ordinaria. Nunca se publicó la totalidad del código fuente, las instrucciones en seudolenguaje o el diagrama de flujo. No se especificaron

---

[5] Véanse las ilustraciones clásicas de Wolfram en http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/83-cellular/index.html y http://www.stephenwolfram.com/publications/articles/ca/86-caappendix/index.html. Los errores perpetrados por Varela son innumerables; los más notorios son (*a*) atribuir "historia" y "biografía" a elementos de sistemas basados en vecindades de Moore de rango 1 y regidos por transiciones irreversibles; y (*b*) imputar "autonomía" y "libertad" a celdas que están supeditadas a las reglas uniformes que un investigador quiera asignarles (Varela, Thompson y Rosch 1992: 178, 180). Ni el modelo de estados del sistema admite esa semántica, ni esa clase de propiedades puede ser emergente en esa clase de formalismo.

condiciones de borde, ni los mecanismos de iteración, contención y paralelismo; la definición de ligadura es indescifrable, las reglas de movimiento son inconsistentes y los dibujos que acompañan el texto (imposibles de generar con ese código) no son siquiera gráficos de computadora. En consecuencia, los esfuerzos de implementadores bien intencionados, como Barry McMullin (1997) no pudieron encontrar el nexo entre los datos experimentales suministrados y la descripción algorítmica, ni hacerlo andar de manera que justificara sus fenomenales alegaciones. *Science* y *Nature* rechazaron la publicación del reporte que incluye el programa; se publicó en *Biosystems*, una revista de la cual Heinz von Foerster (que intervino en la redacción del artículo) formaba parte del comité editorial (Varela 2004: 49).

En suma, los intentos de McMullin (1997; 2004) y McMullin y Varela (1997) no han logrado hacer que el modelo computacional de la autopoiesis se comporte conforme a la teoría; más aún, el funcionamiento de los programas desmiente las premisas teóricas, obliga a introducir código imperativo y enmiendas teóricas de compromiso, y aún así produce avalanchas de errores no triviales. Tampoco lo había logrado Milan Zeleny, cuyos experimentos en lenguaje APL fueron cuestionados por McMullin (2004) desde dentro mismo del movimiento autopoiético. Los pocos sistemas que los partidarios dicen haber hecho funcionar en tiempos recientes son sólo calcos de programas de tipo Vida Artificial o autómatas teselares, carentes de toda especificidad autopoiética; algunos críticos, además, los han sospechado fraudulentos. Alumnos dilectos de Maturana, como Juan Carlos Letelier, Gonzalo Marín y Jorge Mpodozis (2003), por ejemplo, han encontrado que "la clausura exhibida por estos autómatas … no es consecuencia de la 'red' de procesos simulados, sino un artefacto de los procedimientos de codificación".

Estos autores han concluido que la descripción de la autopoiesis computacional ha sido defectuosa y que la misma teoría básica es, en un sentido fundamental, un proceso intrínsecamente no computable. También el eminente Robert Rosen (1991) coincide con esta apreciación, asegurando que los procesos que definen la vida no pueden ser computados por máquinas de Turing o implementados en máquinas de Von Neumann. Tampoco en máquinas paralelas funciona la cosa: entre los miles de reglas que circulan en Internet para autómatas celulares, o entre los procedimientos estándares disponibles para entrenamiento neuronal, no hay un solo caso tangible de formalismo auténticamente autopoiético. Dada la identidad de los algoritmos implicados, y como bien se sabe después de Von Neumann, Ulam, Conway, Wolfram, Kauffman, Rosenblatt, Bateson… difícilmente puede probarse que un sistema no computable exhiba capacidades de percepción diferencial, conocimiento, experiencia, memoria, lenguaje, aprendizaje y reproducción. Aún los partidarios ardientes del conexionismo radical han debido admitir la necesidad de procesamiento simbólico e informacional de tipo Von Neumann para implementar cualquier género de pensamiento lógico, secuencial, lingüístico, reflexivo, composicional, argumentativo y/o jerárquico (Feldman y Ballard 1982: 210; Norman 1986; Marcus 1998: 244, 276; Boden 2000: 142).

Pese a no estar avalado por una sustentación experimental aceptable, el ascendiente de Varela en Francia es asombroso; ha llegado a tener un cargo de director de investigaciones en la CNRS no obstante alentar una postura constructivista que cuesta creer que favorezca a la forma normal de la ciencia. Desde allí ha logrado seducir a estudiosos de renombre, como la psicóloga cognitiva Eleanor Rosch y el filósofo Evan Thompson, lanzándolos a un proyecto de fusión entre las facciones más rígidamente conexionistas de la ciencia cognitiva y el Buddhismo Mahâyâna, interpretado en la clave sapiencial y dalai-lámica típica del orien-

talismo californiano, carente de los recaudos filológicos y del aparato erudito que son de rigor en estudios de religión de un siglo a esta parte. El testimonio de esta amalgama está su libro conjunto, *De cuerpo presente*, traducido al castellano en 1992, sin que ninguno de los textos anteriores de Rosch, algunos de ellos clásicos admirables de la psicología cognitiva, haya merecido igual fortuna. Una década atrás Daniel Dennett (1993), ligado ahora a la memética y a la psicología evolucionaria, ha formulado una crítica breve pero devastadora de esta posición, poniendo en duda que sea tan original como pretende, o que haya logrado (como él cree haberlo hecho) explicar la conciencia.

La influencia de Varela ya era considerable en el gigantesco simposio en torno de *l'unité de l'homme* (Morin y Piattelli-Palmarini 1974), del que se derivó buena parte de los desarrollos franceses en materia de teoría discursiva de la complejidad. Ha tenido un impacto mayúsculo en la teoría *new age* de Fritjof Capra, así como en la sociología sistémica de Niklas Luhmann. Ha dado lugar al movimiento de la investigación social de segundo orden, con centro en España, a la metodología operacional italiana de Silvio Ceccato, a la praxis sistémica de Alemania impulsada por Hans Fischer, Arnold Retzer y Jochen Schweitzer, y a la dinámica organizacional del Centro de Desarrollo Sistémico de Sydney, dirigido por Vladimir Dimitrov. Todos estos desprendimientos entremezclan (1) la complejidad, los sistemas abiertos, el tiempo como dimensión independiente y objetiva, la evolución pre-biótica, el cambio y la irreversibilidad procedentes de Prigogine con (2) la circularidad, los sistemas cerrados, la preminencia del observador, el mantenimiento del equilibrio y los ciclos periódicos de las máquinas autopoiéticas de Maturana y Varela. Nadie se ha percatado que hay una contradicción por cada idea. Recién avanzado el siglo XXI Fritjof Capra (2003: 38-39) comienza a darse cuenta que ambas epistemologías son excluyentes, pero sin advertir todavía de que la especificidad biótica de la autopoiesis no satisface la pauta transdisciplinaria de las ciencias de la complejidad.

En los Estados Unidos, la influencia de Varela y Maturana se encuentra circunscripta al interior de movimientos heterodoxos pos-batesonianos que enarbolan autopoiesis y enacción como si fueran ideas centrales a las ciencias del caos y la complejidad, cosa que resueltamente no son. Ninguno de los estudiosos que haya incidido en el desarrollo de modelos caóticos, redes neuronales, autómatas celulares o redes booleanas en los últimos veinte años ha sacado provecho de los experimentos de Varela; la bibliografía científica reciente sobre auto-organización no considera que Varela y Maturana (o von Foerster) hayan producido alguna idea señalable al respecto (Ball 2001; Shalizi 2001b; Anderson 2002; Camazine y otros 2003; Kubik 2003). De igual modo, ninguno de los científicos de primera línea ajenos al movimiento que investigan propiedades emergentes o agentes autónomos ha dedicado referencias significativas a la autopoiesis, salvo para señalar que lo que creía haber deslindado dista de haber sido resuelto; que en biología molecular se piensa que las propuestas de Varela son *airy-fairy, flaky stuff*; que el 99% de los biólogos serios "nunca ha oído hablar de Francisco"; que el lenguaje autopoiético no agrega nada a la fenomenología biológica; que sus afirmaciones más radicales son simples tautologías; que si se reemplazara "sistema autopoiético" por "sistema viviente" nada cambiaría de lo que ya se sabe; que la autopoiesis no lleva a ningún lugar donde no se haya estado antes; que sus diseños experimentales son inaceptables y que la imagen de los organismos como máquinas que se auto-organizan es una metáfora vieja que se remonta a Immanuel Kant (Kauffman 1995: 274; 2000: epígrafe; Kauffman y Langton en Brockman 2000: 203-208). En la única formalización existente del

concepto de auto-organización, Cosma Shalizi (2001b) no pudo aprovechar ni una sola idea proveniente de la autopoiesis. En sus *Notebooks*, Shalizi declara:

> He leído extensamente sus obras, comenzando con *Autopoiesis*, sin extraer una sola intuición *distintiva* o un resultado de algún valor. Lamento esto, porque todos mis conocidos que han estado en contacto con ellos dicen que [Maturana y Varela] son personas encantadoras, modestas y abiertas (http://cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/self-organization.html).

Mi sentimiento personal ante los textos de Maturana y Varela es de una constante frustración. Ambos prefirieron trabajar en Chile y no en Harvard durante la presidencia de Salvador Allende, y se opusieron luego a la dictadura de Pinochet; existe por ello una disonancia profunda entre las consecuencias reaccionarias de su pensamiento y su postura política. Los dos chilenos, junto con Francisco Flores, alimentaron lo que se conoce como la perspectiva neo-heideggeriana de la ciencia cognitiva, cuyo discurso no es precisamente progresista (Winograd y Flores 1986). Esta corriente se la pasa prodigando elogios a ensayos negativistas como *What computers can't do* de Hubert Dreyfus (1972) disimulando el hecho de que tengan que ser reescritos cada tanto, ya sea porque las computadoras lograron finalmente las hazañas que se les suponía negadas, o porque conviene admitir que determinadas máquinas conexionistas, pensándolo bien, sí pueden hacerlo (Dreyfus 1993; Koschmann 1996). Después que, refutando las predicciones de Dreyfus, Deep Blue derrotara al gran maestro Garry Kasparov, los heideggerianos como Selmer Bringsjord se consolaron diciendo que la máquina no puede sentirse alegre por haber vencido, que la capacidad de cálculo no es más que fuerza bruta y que, contrariamente a lo que todos piensan, el ajedrez es fácil. En fin, si alguien cree que la postura de los heideggerianos tiene alguna plausibilidad, es porque aún no ha leído la crítica demoledora de Seymour Papert (1968), escrita como ejercicio de precalentamiento mientras concebía *Perceptrons* (Minsky y Papert 1969). De todas maneras, la limitación esencial de los aparatos (la imposibilidad de desarrollar un sentimiento del yo y una autoconciencia), ya no es más relevante para establecer su contraste con el sujeto humano después que Varela decidió hacerse buddhista.

Mientras Varela escribe con fluidez, la escritura de Maturana se encuentra más allá del filo del caos; sus frases sustantivizan los infinitivos ("el lenguajear", "el vivir", "el operar", "el acontecer", "el explicar"…), como si la trascendencia de lo que expresan justificara esa rudeza comunicativa. Se ha dicho que el vocabulario autopoiético es "característicamente opaco", que está preñado de "excentricidades teóricas", que su escritura es "pobre y tautológica" y que habla un lenguaje oscurantista incomprensible, notoriamente difícil de traducir a expresiones argumentativas de la ciencia normal (Gallardo 1997; Palmer 1998; Boden 2000: 123; Lynn Margulis en Brockman 2000: 207-208). Su sintaxis funciona, además, conforme a un extraño principio de analogía; desdeñando la enseñanza de Bateson sobre los tipos lógicos y el metalenguaje, sus oraciones entran en bucle cada vez que les toca referirse a fenómenos recursivos, lo cual ocurre prácticamente todo el tiempo:

> Los estados del sistema nervioso en tanto que unidad compuesta son relaciones de interacciones entre sus componentes, aunque, al mismo tiempo, es mediante la operación de las propiedades de sus componentes que el sistema nervioso interactúa como entidad compuesta. Más aún, la estructura y el dominio de estados del sistema nervioso cambian al cambiar las propiedades de sus componentes como resultado de los cambios provocados en ellos por sus interacciones. Debido a esto, al cambiar la estructura de los componentes del sistema nervioso como resultado de sus interacciones, cambian la estructura y el dominio de los es-

> tados del sistema nervioso integrado por componentes también cambiantes, y esto sucede así al seguir un curso que depende de la historia de sus interacciones (Maturana 1996: 54).

Maturana no ha querido proporcionar el atajo para expresar no recursivamente los procesos recursivos, y es por ello que se enreda en la circularidad perpetua de máquinas a las que describe en su mismo nivel de tipificación. Hay una diferencia sutil pero crucial entre recursividad y circularidad: una definición recursiva se refiere a *otra instancia de la misma clase*; una definición circular define algo en función de *lo mismo*; aquélla es una poderosa idea; ésta es y será, en cualquier paradigma lógico, la falacia más torpe de todas (Hofstatder 1992). A falta de una especificación adecuada, las presuntas recursividades de Maturana califican como lo que parecen: circularidades, o más bien linealidades en redondo.

Aunque los autopoiéticos afecten sensibilidad a los matices, cada factor de su teoría y de su práctica que involucre una decisión epistémica importante es inherentemente predecible; sin importar cuál sea el experimento que se lleve a cabo, la interpretación de los resultados está definida de antemano. Se puede apostar que esos autores estarán siempre a favor de un lenguajear whorfiano sin atributos antes que de las gramáticas formales de la lingüística; del constructivismo contra el conductismo; de lo subjetivo a expensas de la objetividad; de una emergencia inexplicada en contra del procesamiento de la información; de von Foerster y Gödel en vez de Wiener y Turing. Nunca nos sorprenden concediendo alguna razón a sus adversarios, admitiendo un atolladero o adoptando un auténtico término medio. Siempre deciden sus elecciones conforme a patrón idéntico, sin encontrar jamás un obstáculo, sin dudar alguna vez, persuadidos de que una perspectiva como la suya goza desde el vamos de una excelencia moral inaccesible a los científicos vulgares. Y siempre caen en el constructivismo más irreflexivo, que gusta ilustrar su postura afirmando, típicamente, "no podemos afirmar que exista esa pared", argumento formalmente idéntico a "nadie puede asegurar que ha habido un holocausto".

El ambicioso esquema de Maturana y Varela, ejemplar culminante de una narrativa que todo lo explica, articula (distinción observacional e interacción mediante) las "emergencias" que se necesitan en los lugares que hacen falta, a lo largo de las jerarquías que van desde las moléculas orgánicas hasta el conocimiento, el lenguaje y la cultura. Nadie se detiene a pensar que cada emergente específico debería ser demostrado por vía experimental, razón matemática o evidencia empírica, conforme es práctica para los fenómenos de emergencia en cualquier ciencia de la complejidad. No se requiere mucho escrutinio para advertir que esa demostración no existe. También falta, a propósito de lo que argumentan sobre la cultura y el lenguaje, el más mínimo examen del estado del conocimiento en antropología, psicología o lingüística. Como es objetivamente palpable que en los puntos de inflexión críticos faltan explicaciones no circulares y pruebas no tautológicas, los autores redefinen objetividad y explicación conforme a las necesidades del modelo, alegando que la circularidad de sus definiciones constituye su principal virtud (Von Glasersfeld s/f; von Foerster en Pakman 1991: 89; Varela 2004: 45-46). También definen "conocimiento" o "conciencia" como conviene a su argumento, de manera tal que después los acólitos puedan decir que sus maestros han explicado la conciencia o el conocimiento, haciendo como que olvidan que las definiciones son otras (p. ej. Behncke 2003: xix, xxiii). Es que los seguidores de la doctrina son en verdad incondicionales; a algunos de ellos (como los de Oikos.org) les parece un toque de grandeza que Maturana jamás mencione a nadie que no sea él mismo.

Mientras en la ciencia común la disidencia es norma, conozco pocos antropólogos posmodernos o interpretativos que no estén en lo esencial de acuerdo con Maturana y Varela; es este conformismo lo que motiva mis reservas. Mi problema con la autopoiesis no es su oferta conceptual, sino la demanda existente de esa clase de argumentos reconfortantes y su circulación en el interior de una cofradía de afines que se identifican por su argot en clave, se sienten radicales, se atribuyen mutuamente la categoría de genios en cada *Festschrift* u obituario que escriben y no admiten nada que venga de afuera. Su autopoiesis y su enacción proporcionan una nomenclatura de recambio y un mito de fundamentación para que muchos expresen con las palabras cambiadas lo mismo que siempre estuvieron pensando, creyendo ahora que están en comunión con la complejidad y en posesión de una sabiduría singular. Incluso profesionales no posmodernos se han sumado a la caravana y suponen que la autopoiesis armoniza con las ideas de Prigogine o las teorías del caos, aunque no exista ninguna relación esencial entre ellas, y a despecho de que Prigogine haya establecido rotundamente su oposición a cualquier conato de constructivismo (véase Mier 2002: 86-87; Prigogine 1998: 25, 26, 37, 76; Spire 2000: 70, 85). Ante las críticas, los autopoiéticos tienen armadas dos variedades de réplica; las respuestas de Tipo 1 consisten en impugnar las capacidades de discernimiento y comprensión de quienes los cuestionan, o imputarles mala voluntad, en vez de poner en duda la competencia de sus propios discursos para comunicar y demostrar en la forma que la ciencia acostumbra hacerlo (Glasersfeld s/f; Maturana 1990; Pérez Soto 1994; King 2001; Varela 2004: 47-49). Las respuestas de Tipo 2 consisten en mover el vértice de discusión ya sea hacia el dominio conceptual del observador o hacia el de lo observado, lo que acarrea que el crítico deba aceptar la relevancia de esa distinción en los términos en que los autopoiéticos deseen establecerla (Maturana 1991).

En suma, la autopoiesis no agrega nada que sea (simultáneamente) interesante, original y verdadero a la discusión contemporánea sobre las problemáticas de la complejidad. De los formidables recursos institucionales y del ritmo frenético de producción de textos que han caracterizado desde siempre a estas teorías, yo hubiera esperado al menos un caudal de ideas más imaginativo y una epistemología menos insidiosa.

2.5.4 – La realidad negada: Constructivismo radical

Se planteaba hace un tiempo Jorge Wagensberg:

> [L]a complejidad de los objetos de nuestro interés puede llegar a desanimarnos a la hora de una rigurosa observación de tales principios. ¿Cómo ser realistas al abordar, por ejemplo, el estudio de la propia mente?, es decir, ¿cómo separar la mente de sí misma? ¿Cómo ser determinista al estudiar el caprichoso comportamiento de un ser vivo? ¿Cómo experimentar cuando diseñamos un programa macroeconómico a largo plazo? En tales casos, y si mantenemos nuestra pretensión de elaborar conocimientos en forma de leyes, los principios del método científico deben forzosamente relajarse. Por este procedimiento, por el procedimiento de ablandar el método, la ciencia deriva hacia la ideología. La esencia de la ideología ya no es la investigación, sino la creencia. De este discurso se infiere que hay que rellenar con ideología todos aquellos agujeros que la ciencia deja vacíos (Wagensberg 1992: 12).

Como acostumbra decirse, un vaso colmado hasta la mitad se puede ver como medio lleno o medio vacío. Se puede creer, con Wagensberg, que en la naturaleza no todo es factible, que de todos los sucesos posibles que podrían ser no todos son, que las leyes científicas son

limitaciones que restringen el caos, o por el contrario se puede entrar en pánico frente al azar y considerar que las leyes tienen poco sentido, o que ya no son leyes en absoluto. En disciplinas y escenarios donde la causalidad se diversifica, aparecen cantidades inciertas y dimensiones fraccionarias, o donde las matemáticas son tabú, es de esperar que las ciencias de la complejidad degeneren en pantallas proyectivas en las que el investigador se consagra a maximizar la ideología y encontrar sólo lo que le satisface.

Tomando como punto de partida los principios de la autopoiesis, una conclusión ineludible es que el sujeto-observador, máquina autopoiética por excelencia, no sólo responde creativamente al estímulo, sino que es la pieza esencial en el juego que lo genera. Es el principio de construcción de la realidad (el viejo construccionismo), sólo que llevado a su extremo: la realidad es inventada, no ya por sociedades sino por sujetos cognoscentes en interacción. A partir de allí esta idea, que en su forma más extrema recibe el nombre de constructivismo radical, no versa sobre otra cosa que sobre sí misma, aportando uno tras otro raudales de elementos de juicio que supuestamente la corroboran.

No vale la pena referirlos en detalle, ni ceder a la tentación de refutarlos. Entre esos elementos están todos los que cabe esperar: las viejas ilusiones ópticas de la psicología de la Gestalt, la subjetividad de las sensaciones, los dilemas filosóficos de la causalidad y del primer motor, la paradoja de Epiménides, el punto ciego, la indeterminación cuántica, el gato de Schrödinger, la recursividad, la participación activa del ser vivo en la percepción de las formas, la relatividad contextual de la deixis, la semiosis infinita, la arbitrariedad de los signos y hasta los números imaginarios. Ni siquiera se trata ya de proporcionar una epistemología para abordar las realidades complejas, por más que una gran narrativa teórica (la teoría de las estructuras disipativas) haya estado ligada a los orígenes del movimiento, y por más que los fundadores de la formulación constructivista hayan estado expuestos a su mensaje. La realidad para ellos no es compleja; tampoco simple, porque no es real. Los textos del movimiento llevan nombres tales como *La realidad inventada* (Watzlawick y otros 1988), *¿Es real la realidad?* (Watzlawick 1994) o *La realidad: ¿objetiva o construida?* (Maturana 1996). Hay por cierto matices, diferencias y formas débiles dentro de la escuela; Maturana, indignado, a veces finge que detesta el constructivismo (Halperin 1992); otros miembros del grupo se jactan de su diversidad interna enumerando variantes (a razón de un pensador por corriente), mientras otros sobreactúan su condena al solipsismo como si éste fuera mucho más feo o algo muy distinto. Pero ni aún de la variedad minimalista puede decirse que haya sido argumentativamente necesaria o científicamente fecunda.

No quiero pasar por alto la oportunidad de documentar que la tesis central del constructivismo (junto con la prioridad del observador de la autopoiesis) se encuentra en abierta oposición a convicciones cardinales de Ilya Prigogine. Decía éste:

> La idea de una omnisciencia y de un tiempo creado por el hombre presupone que el hombre es diferente de la naturaleza que él mismo describe, concepción que considero no científica. Seamos laicos o religiosos, la ciencia debe unir el hombre al universo. El papel de la ciencia es precisamente el de encontrar estos vínculos, y el tiempo es uno de esos. El hombre proviene del tiempo; si fuese el hombre quien creara el tiempo, este último sería evidentemente una pantalla entre el hombre y la naturaleza (Prigogine 1998: 26).

Y también:

> En la cosmología que acabo de exponer, es la totalidad la que desempeña el papel determinante. El hecho singular, individual, sólo se vuelve posible cuando está implicado en semejante totalidad (Prigogine 1998: 76).

Cuando se pidió a Prigogine que escribiera la frase que sintetizaba su pensamiento en la pared de la Universidad Lomonosov de Moscú, no titubeó en escribir: "El tiempo precede a la existencia". Insistió en ello infinidad de veces, pues para él el tiempo es un "absoluto" que precede a toda existencia y todo pensamiento (Spire 2000: 70; Prigogine y Stengers 1991: 183, 187). Prigogine coincidía con Einstein en que las leyes de la física no pueden depender de la subjetividad de un observador humano. Suscribía también a la idea de Max Planck que establece que las dificultades de la segunda ley de la termodinámica residen "en la naturaleza observada, y no en el Observador" y que la necesidad de la experiencia humana para deducir la ley "es inmaterial" (Gustafson 2003: 10; Prigogine 1997: 35). Ahora bien, si Prigogine discrepaba de tal manera con los autopoiéticos y los constructivistas, habría que preguntarse por qué permitió que ellos presentaran sus ideas como afines a su pensamiento, en el que hay un concepto tan firme de la realidad y del papel de la ciencia frente a ella.

Visto como una trayectoria desde la ideas de Prigogine hasta una filosofía que toma la decisión de impugnar el mundo, el constructivismo se puede entender como la forma más drástica de rehusar los problemas de la complejidad que aquéllas definieran: dejar de plantearlos, o directamente negar que exista algo objetivo acerca de lo cual hacerlo. Dado que el constructivismo ya no se ocupa de asuntos que tengan que ver con la complejidad (o con la cultura) de un modo científicamente útil, prescindiré de discutir aquí las ideas que han formulado. Basta decir, como elemento de juicio de valor diagnóstico, que los posmodernos de mayor renombre no han mostrado hasta hoy ningún entusiasmo por sus formas radicales, a pesar de sus afinidades ideológicas. El recelo de los líderes posmodernos frente al constructivismo es comprensible: hasta la autopoiesis, inclusive, cualquier argumento heterodoxo llevaba agua a sus molinos; pero el constructivismo no les deja ni siquiera el consuelo de simulacros disponibles para deconstruir. Ya no hay nada de lo cual hablar, ni qué decir. ¿Alguien puede imaginar un posmoderno guardando silencio?

2.5.5 – Estructuras disipativas en la cultura: Adams

Las ideas de Ilya Prigogine en torno de las llamadas estructuras disipativas y de los sistemas alejados del equilibrio fueron aplicadas en antropología por Richard Newbold Adams. Esta extrapolación se desarrolló en dos etapas. La primera está representada por el libro de Adams *Energía y Estructura. Una teoría del Poder Social*, publicado en 1975. El motivo principal de este libro se funda en la extrapolación hacia el estudio de la dinámica del poder de la segunda ley de la termodinámica**.** Adams comienza argumentando que en el paradigma de la dinámica clásica (que es un modelo mecánico), el cambio servía siempre para restablecer el equilibrio, y las teorías del equilibrio tienden en general a proponer procesos reversibles: la formación de cristales, la oscilación de un péndulo. La segunda ley de la termodinámica (que está inserta en un modelo estadístico) propone un estado de cosas diferente: aduce la existencia de otros procesos, unidireccionales e irreversibles.

Cuando se quema un combustible no hay manera de recombinar la energía perdida en el calor atmosférico y volver a obtener lo que se tenía antes. La materia y la energía no son intercambiables, pues entre ambas se interpone cierta degradación o entropía. La concepción del universo surgida a la luz de la termodinámica se refiere a un agregado masivo de formas

de energía que paulatinamente se están agotando, en un camino irreversible hacia el colapso final. Pero no es posible (dice Adams) que una ley tan lúgubre sirviera para explicar eventos expansivos, como parecía ser la civilización tras la revolución industrial. A principios del siglo XX la teoría darwiniana de la evolución se unió a la segunda ley de la termodinámica para explicar por qué en lugar de seguir un proceso de degeneración caótica las especies vivientes tienden hacia formas de existencia cada vez más organizadas, expansivas y complejas. Alfred Lotka (quien formuló inicialmente estas teorías) sostuvo que esta aparente violación de la segunda ley de la termodinámica se debía a que las especies utilizaban cantidades cada vez mayores de energía, extrayéndola del medio ambiente. Las especies que gastan mayores cantidades de energía poseen ventaja sobre las que consumen menos, las que en general tienden a convertirse en sus presas. Algunos antropólogos de las décadas de 1940 y 1950 congeniaron con estas ideas, como fue el caso de Fred Cottrell y sobre todo Leslie White. Después de la Segunda Guerra se comprendió que no son las especies las que constituyen las unidades de supervivencia, sino los sistemas de especies en el contexto de su medio ambiente. Esta es la clave del modelo ecosistémico, elaborado en ecología humana y animal por Howard Odum, Ramón Margalef y otros autores.

La segunda etapa en la aplicación de las estructuras disipativas en antropología por parte de Adams se desarrolló después que éste conociera personalmente a Ilya Prigogine e intercambiara ideas con él en la Universidad de Texas en Austin. Esa experiencia aparece reflejada en un segundo libro, editado inicialmente en México en 1978, llamado *La Red de la Expansión Humana*. Lo primero que seduce a Adams es la ruptura de Prigogine con la física newtoniana, columna vertebral de la dinámica clásica. Prigogine sostenía que ni la dinámica ni la termodinámica por separado eran suficientes para explicar el surgimiento de nuevos sistemas. Se hacía necesario un tercer campo teórico, y éste se constituyó alrededor de los sistemas que se encuentran lejos del equilibrio. Este nuevo modelo integra determinismo e indeterminismo como cualidades de fases concretas del proceso de cambio en sistemas alejados del equilibrio, caracterizados como estructuras disipativas. Un rasgo central de una estructura disipativa es que necesita un insumo constante de energía para mantenerse; la falta de insumo provoca, paradójicamente, la disipación de la propia estructura. En el transcurso de su existencia, las estructuras disipativas manifestarán una condición homeostática, o sea un estado estable. La duración de este estado puede variar, pero en los sistemas vivos debe durar, desde luego, el tiempo necesario para su reproducción. El tamaño y la forma de cualquier estructura estarán determinados por la cantidad de energía que fluye a través de ella; pero algunas estructuras, como los organismos vivientes, poseen mecanismos de control interno que limitan el tamaño final, permitiendo que su crecimiento estructural sea previsible en líneas generales.

Hasta aquí todo bien, sin duda; el problema es que sólo hasta aquí se llega. Adams no es, según los indicios, un teórico laborioso; la dimensión metodológica de su modelo está sin desarrollar. ¿Cómo podría identificarse una estructura disipativa en una investigación empírica? ¿Qué se puede hacer con los fenómenos culturales, aparte de ratificar una teoría física? Adams no consigna indicadores ni criterios para mapear el paquete conceptual contra la realidad. El antropólogo que piense seguirlo en su aventura paradigmática no dispone de guías de operacionalización, sino a lo sumo de unos cuantos ejemplos de sociedades que consumen energía de una forma u otra. Desde ya, muchos de quienes teorizan en otras escuelas antropológicas han sido tan reacios como Adams en lo que concierne a enseñar cómo se despliegan los métodos que les son propios; pero ésta es una falla grave en una forma

teórica cuyo valor fundamental debería ser la fuerza operativa. El beneficio que se obtendría adoptando el concepto de estructuras disipativas frente a otras opciones funcionalistas o ecosistémicas no parece entonces muy sustancioso, salvo por el placer de dar nuevos nombres a viejas categorías. En toda la propuesta no hay nada que se parezca a una formalización, y la única garantía científica que subsiste es la satisfacción de saber que el creador de la idea originaria ha sido merecedor de un premio Nobel.

Hay algo que tampoco convence en la relación que establece Adams entre la sociedad humana en su conjunto y las sociedades particulares. Él dice que las sociedades difieren en cuanto al tiempo necesario para asegurarse los insumos, mantener el flujo de energía y reponer las formas esenciales que son necesarias para la vida en una sociedad particular. Este "costo energético de la producción" es un elemento cardinal, dice, en la trayectoria vital de cualquier estructura disipativa, porque cuando llega a ser equivalente a los insumos de la estructura ya no hay posibilidad de expansión y crecimiento. Por la manera en que presenta este argumento, parecería que existen posibilidades de focalizar el análisis en sociedades particulares, lo cual no es consistente con su propuesta de que la unidad analítica, *la* estructura disipativa, es la totalidad de la especie humana. Los críticos de la postura de Adams desde la ecología cultural aplaudieron la intensidad de su esfuerzo, pero también cuestionaron que concentrase su interés en el estudio necesariamente especulativo de la emergencia del poder político y las clases sociales, en lugar de indagar a la luz de los nuevos modelos las relaciones entre los humanos y el ambiente. Al tomar esa decisión, dicen, ha perdido una preciosa oportunidad para analizar las implicancias de la teoría ecológica en la evolución cultural (Abel 1998: 17).

El último gran tratado prigoginiano de Adams es *El octavo día* (2001), escrito hacia 1988. Aunque su elaboración teórica es más espaciosa, el texto, que al lado de las estructuras disipativas incorpora un poco de autopoiesis, impresiona como fruto de un monismo reduccionista en el cual el consumo de energía es la única variable a considerar en un universo en perpetuo proceso evolutivo. Adams tampoco percibe la discordancia entre las ideas de Prigogine (sistemas alejados del equilibrio, generalidad, totalidad, irrelevancia del observador, realidad objetiva) y la autopoiesis (máquinas homeostáticas, especificidad biótica, autonomía, primacía del observador, realidad inventada). Ocupado en escribir sus cuatrocientas páginas, Adams tampoco tiene tiempo esta vez de desarrollar ejemplos, ni de implementar métricas. Sabiéndose en falta, pide disculpas por ello (p. 30).

En síntesis, Adams no consuma ninguna sistematización, salvo que se entienda por ello un conjunto desordenado de analogías circunstanciales entre propiedades adscriptas por los científicos a dichas estructuras y un paquete de rasgos indistintamente reconocidos en la sociedad humana en su conjunto, en sociedades particulares, en algunos aspectos de todas las sociedades o en unas pocas características de alguna sociedad en particular.

2.5.6 – Paisajes mentales : El Modelo de Maruyama

Magoroh Maruyama, profesor de Ciencias Administrativas de la Universidad del Sur de Illinois, fue el creador de la segunda cibernética, que no ha de confundirse con la cibernética de segundo orden de Heinz von Foerster (Maruyama 1968; Foerster 1973). Mientras aquélla se basa en el concepto de alimentación hacia adelante en detrimento del *feedback* negativo, ésta desplaza el interés por los sistemas observados de la primera cibernética hacia los llamados sistemas observadores. En 1980, Maruyama publicó en *Current Anthropology*

un artículo titulado "Mindscapes and Science Theories" que produjo una respuesta destemplada por parte de sus comentaristas. En ese ensayo Maruyama procuró correlacionar diferentes metatipos causales en teoría científica con tipos epistemológicos o paradigmas a los que bautizó *mindscapes*. En las diversas teorías sociales y biológicas de la actualidad, dice Maruyama, se pueden reconocer cuatro formas distintas de concebir la causalidad:

1) Los *modelos causales no-recíprocos*, en los que las relaciones causales pueden ser probabilistas o deterministas, pero en los que no hay bucles de realimentación, obedeciendo sus relaciones causales al principio de la transitividad. En estos modelos la evolución se caracteriza como la supervivencia de los más aptos a través de la competencia y por la idea de que todas las civilizaciones siguen el mismo camino evolutivo y, en consecuencia, algunas son más avanzadas o más infantiles que otras. Condiciones similares conducen a resultados similares. Estos modelos coinciden con los que otros autores consideran modelos mecánicos.

2) Los *modelos independientes de los sucesos*, en los que los estados más probables de un conjunto obedecen a una distribución al azar de sucesos independientes, no demasiado estructurados. En estos modelos la evolución procede por cambios al azar. La estabilidad está puntuada por cambios súbitos en direcciones impredecibles, a los que siguen períodos de estabilidad. No hay una dirección evolutiva coherente. Estos modelos estocásticos se asemejan a los que en este libro hemos llamado modelos estadísticos.

3) Los *modelos homeostáticos con bucles causales*, en los que las relaciones pueden ser probabilistas o deterministas y pueden además formar bucles; en estos modelos las estructuras y los patrones de heterogeneidad se mantienen mediante esos bucles. Estos modelos se utilizaron después de la Segunda Guerra y eran congruentes con la teoría económica tradicional del equilibrio y con la antropología funcionalista. En estos modelos la evolución es el resultado de interacciones entre elementos heterogéneos. Para una condición dada (espacio, energía, temperatura, materiales orgánicos disponibles) la evolución procede a través de una configuración estable de interacciones o ciclos. Cada cultura se adecua a sus condiciones locales y alcanza un estado que, si es satisfactorio, perdura. Los cambios se deben a influencias procedentes del exterior o a invenciones ocasionales. Condiciones distintas pueden llevar a los mismos resultados, y viceversa.

4) Los *modelos morfogenéticos con bucles causales*, en los que bucles probabilistas o deterministas pueden incrementar la heterogeneidad, generando patrones de relaciones entre elementos heterogéneos y elevando el nivel de sofisticación del sistema. En este modelo la evolución puede ser continua; dado que los cambios pueden ser amplificados por bucles causales, existen muchas direcciones evolutivas posibles, aún dentro de un mismo conjunto de condiciones.

Según Maruyama, existen cuatro tipos epistemológicos o *mindscapes* correspondientes a los metatipos causales que se han descripto:

Tipo	Componentes	Relaciones entre componentes	Proceso
H	Homogéneos	Jerárquicas	Clasificacional
I	Heterogéneos	Individualistas	Al azar
S	Heterogéneos	Interactivos	Homeostático
G	Heterogéneos	Interactivos	Morfogenético

Tabla 2.4 - *Mindscapes*

Un *mindscape* es una estructura de razonamiento, cognición, percepción, conceptualización, diseño, planeamiento y elección que varía de uno a otro individuo, profesión, cultura o grupo social. No existen los tipos puros, naturalmente, y siempre hay un poco de mezcla. La mayor parte del artículo de Maruyama consiste en una caracterización de los *mindscapes* tomando en cuenta sus respectivas filosofías, éticas, prácticas de toma de decisiones, políti-

ca ambiental, valores, principios estéticos en diseño urbano, elección de alternativas de arquitectura, actividad social, religión, causalidad, lógica, conocimiento, percepción y cosmología. El cuadro no admite demasiado resumen, pues su estructura radica en el detalle de sus enumeraciones; vale la pena reproducirlo en extenso, omitiendo algunas categorías sin interés antropológico directo.

Tipo H:

*Filosofía general***:** Las partes están subordinadas al todo. Hay una forma de hacer las cosas que es la mejor. Los principios universales se aplican a todo. La sociedad consiste en categorías, estructuras, infraestructuras, superestructuras.

*Ética***:** Los poderosos dominan a los débiles. Lo que gana un individuo lo pierde otro (suma cero). Las decisiones deben tomarse contando los votos (la cantidad decide) o por consenso (se presume la existencia de una solución mejor para todos). Lo que beneficia a muchos es mejor que lo que beneficia a pocos. Las minorías se pueden sacrificar (efectos colaterales). Los que no son estándar son anormales, desviados o delincuentes y se los debe castigar o eliminar.

*Política ambiental***:** Como lo que gana uno lo pierde el otro, o se beneficia la industria a expensas del ambiente o se protege al ambiente en contra de la industria.

*Valores***:** Los valores se ordenan en un rango y este rango es válido en todas las culturas porque la naturaleza humana es igual en todas partes. Se puede aplicar a todas las culturas una misma lista de "necesidades humanas básicas".

*Religión***:** Hay un creador omnipotente, omnisciente y perfecto, que diseñó el universo y lo controla. La obra misionera consiste en convertir a los demás. Todas las religiones honran a los mismos dioses bajo diferentes nombres. Otra versión de este tipo (por ejemplo en India o en la teología de Teilhard de Chardin) afirma que todo concurre hacia una unidad final.

*Causalidad***:** Dos cosas no pueden causarse mutuamente. Muchas cosas pueden causar una sola, y una sola puede causar muchas; pero no hay bucles: la causalidad es lineal.

*Lógica***:** Es deductiva y axiomática. Lo general tiene prioridad sobre lo específico. El razonamiento circular está prohibido; el razonamiento debe ser secuencial, sin bucles.

*Conocimiento***:** Hay una sola verdad. Si todos fueran educados del mismo modo, pensarían lo mismo. El conocimiento de lo general es más elevado que el de lo particular. Se deben buscar principios generales. Los hechos reflejan principios universales. La realidad objetiva existe con independencia del observador. La medición cuantitativa es esencial al conocimiento. Lo que no puede medirse es irreal o inválido.

*Cosmología***:** El universo es homogéneo en tiempo y espacio. Los procesos se repiten si las condiciones vuelven a ser las mismas.

Tipo I:

*Filosofía general***:** La sociedad es un agregado de individuos que piensan y actúan independientemente. Sólo los individuos son reales.

*Ética***:** Todos deberían ser autosuficientes. Ser pobre es culpa de la persona. Las obligaciones sociales deberían minimizarse; se debería enfatizar todo lo privado. Las interacciones son mutuamente dañinas (suma negativa). Uno debería votar conforme a su propio interés.

*Política ambiental***:** Si la gente abandona la ciudad por el campo y criara sus propias plantas, no existiría el problema ambiental.

*Valores***:** Cada persona tiene su propio sistema de valores, y la conducta depende de ellos. La integridad de la persona consiste en adherir a su propia tabla de valores, digan lo que digan los demás.

*Religión***:** Cada individuo tiene sus propias creencias.

*Causalidad***:** Los eventos son independientes, y todo se debe al azar.

*Lógica***:** Cada problema tiene su propia respuesta.

*Conocimiento***:** Se deben investigar sólo las piezas de información que se necesitan; es inútil buscar principios universales o aprender lo que esté más allá del propio interés.

*Cosmología***:** El estado más probable es la distribución al azar de sucesos independientes, cada uno con su propia probabilidad. El universo decae, porque las estructuras no pueden mantenerse.

Tipo S:

*Filosofía general***:** La sociedad consiste en individuos que interactúan para la ventaja mutua. Las interacciones mantienen un patrón armonioso de heterogeneidad o se alternan por ciclos. Las interacciones no son jerárquicas.

*Ética***:** Los diferentes individuos se ayudan entre sí porque se complementan. Las diferencias son necesarias y beneficiosas. La igualdad genera competencia y conflicto, mientras que la diversidad permite el beneficio mutuo. La armonía es un bien que debe mantenerse.

*Política ambiental***:** La naturaleza ha alcanzado un equilibrio estático muy delicado. Matar un solo insecto es perturbarla. Se debe mantener la naturaleza tal cual está.

*Valores***:** Los valores están interrelacionados, y no se pueden ordenar en categorías independientes ni en jerarquías. No se pueden definir universalmente. Las "necesidades básicas" varían con la cultura. El comportamiento de una persona se relaciona con el de los demás y con el contexto.

*Religión***:** No hay jerarquías entre dioses diferentes; los dioses no son ni perfectos, ni omniscientes, ni omnipotentes. Pueden estar personalizados o no. Las prácticas religiosas buscan perpetuar la armonía.

*Causalidad***:** Muchas cosas pueden causarse mutuamente a través de bucles a corto o largo plazo. Las desviaciones del patrón se corrigen por medio de interacciones mutuas.

*Lógica***:** La lógica involucra la comprensión simultánea de las relaciones mutuas. Las definiciones son también mutuas, no jerárquicas. La ley de identidad es irrelevante: *A* no es *A* por algo inherente, sino por su relación con lo demás. Las categorías no son mutuamente excluyentes. Los valores lógicos no se pueden situar en un orden.

*Conocimiento***:** La verdad es complementaria, como la visión binocular. Las diferencias subjetivas permiten que todos capten algo que no es percibido por las partes; esto es lo que se llamaría "análisis trans-subjetivo".

*Cosmología***:** Hay armonía entre los elementos heterogéneos. Ella se mantiene porque la interacción corrige las desviaciones. El universo se mantiene a sí mismo.

Tipo G:

*Filosofía general***:** Los individuos heterogéneos interactúan en busca del beneficio mutuo. Las interacciones no jerárquicas generan nuevos patrones y diversidades.

*Ética***:** Los individuos diferentes deben ayudarse mutuamente. Las diferencias son necesarias y beneficiosas. La identidad genera competencia y conflicto. Todas las partes ganan de la interacción recíproca (suma positiva).

*Política ambiental***:** La naturaleza cambia continuamente. No es natural pretender que el entorno sea inmutable. Las relaciones entre los humanos y el entorno deben ser mutuamente benéficas (por ejemplo, las heces humanas se podrían convertir en fertilizantes).

*Valores***:** Los valores están interrelacionados y no se pueden ordenar en una jerarquía. Nuevas situaciones crean nuevas significaciones.

*Religión***:** Similar a S, con la diferencia de que G está más orientado hacia el cambio y la búsqueda de nuevas armonías.

*Causalidad***:** Muchas cosas pueden causar muchas otras a través de bucles causales cortos o largos. Las interacciones generan más heterogeneidad.

*Lógica***:** Igual que S.

*Conocimiento***:** Igual que S.

*Cosmología***:** Las interacciones generan mayor diversidad, y los nuevos patrones son sucesivamente más ricos y refinados. El universo crece.

Encuentro que los procesos mutuos causales de ampliación de la desviación de Maruyama forman familia con la retroalimentación positiva de Norbert Wiener, la esquismogénesis opositiva de Gregory Bateson, la alimentación hacia adelante de Robert Rosen y la autodetonación de Richard Adams. Pero es a partir de Maruyama que heterogeneidad, mutualidad y cambio se van tornando en las claves de la cibernética tardía y en las polaridades favoritas de los estudiosos que siguen el movimiento. De Maruyama en adelante comienza a decaer el prestigio del *feedback* negativo y a exaltarse la retroalimentación positiva como inductora de creatividad; esta axiología caracteriza a la cibernética del último tercio del siglo XX, a los paradigmas de Morin y Capra y a la investigación social de segundo orden.

La aplicación del esquema de Maruyama resulta ser más simplista que compleja. Él considera que en la civilización europea ha prevalecido el *mindscape* H, mientras que la mayoría de los rebeldes poseía una mentalidad I. Muchos ejemplos proceden de la arquitectura, donde los polos de la oposición son ocupados por los europeos de un lado y los japoneses del otro. No hay tipos puros, naturalmente. Maruyama afirma que en diferentes culturas se pueden encontrar diversas combinaciones de ellos; los Mandenka poseen un tipo GH, los Navajo una mentalidad SGI. El resto de su artículo es una laboriosa recopilación de ejemplos episódicos de personajes o culturas aptas para ilustrar uno u otro tipo de mentalidad.

La respuesta crítica al artículo de Maruyama fue variada, con prevalencia de evaluaciones fuertemente negativas. Lucy Jane Kamau, de la Universidad del Noreste de Illinois, afirmó por ejemplo que los *mindscapes* de Maruyama constituyen un refrito de los clichés atestados de jerga de los años 60, incluyendo chicos buenos de un lado del continuum y chicos malos del otro. El mismo Maruyama comenta que él posee una mentalidad G, la más positivamente caracterizada. Kamau alega que Maruyama muestra escasa familiaridad con la literatura antropológica y que sus datos transculturales son poco convincentes. “Es una pena que un tema tan importante y complejo como el pensamiento humano pueda ser, literalmente, tan trivialmente tratado”. Otros autores fueron más condescendientes. David Kronenfeld dijo que el ensayo era inusual, intrigante y estimulante. Karl Pribram, cultor del llamado paradigma hologénico y de tipologías que a mi juicio son, como las de Maruyama, evocativas de los horóscopos, admite que el artículo de referencia toca en él una cuerda resonante. El único crítico que a mi juicio planteó cuestiones sustanciales fue Penny Van Esterik, quien se pregunta cuál es la base de los tipos epistemológicos de Maruyama, de donde salen rela-

ciones tan simples entre fenómenos culturales y mentales tan complejos, cómo se relacionan los *mindscapes* con los tipos caracterológicos o los estilos cognitivos y cómo se incorporan a través de la cultura.

La respuesta de Maruyama fue brevísima, abarcando menos de media página. Sólo expresa que el estado de la cuestión después de las críticas plantea la necesidad de emprender una serie de investigaciones más pormenorizadas que él, por estar trabajando en una escuela de administración, no estará en condiciones de emprender hasta que cambie de institución laboral. En el cuarto de siglo transcurrido desde la publicación de su famoso artículo, la investigación faltante no fue en apariencia llevada a cabo. Aparte de unas pocas menciones en congresos y simposios, y de circular en el ámbito de la ecosofía y el *business & management*, la literatura sobre los *mindscapes* no prosperó; la segunda cibernética tampoco logró mucho impacto en las ciencias básicas, fuera de conseguir un puñado de citas a sus textos fundacionales. En el terreno de las ideas complejas, no es fácil ganar un lugar en la historia.

2.5.7 – El desorden: Balandier y la morfogénesis de la Antropología Dinámica

En el curso de la década de 1970, la cibernética tardía y la autopoiesis comenzaron a penetrar en Francia vía Henri Atlan, Massimo Piattelli-Palmarini y Edgar Morin, encontrando un terreno ya abonado por Henri Laborit, Jacques Sauvan, Jean-Pierre Changeux, François Jacob, Jacques Monod, Yves Barel y otros frecuentadores de epistemologías límites y aleaciones heterodoxas (Morin y Palmarini 1974). Varias disciplinas humanísticas se vieron afectadas por la novedad. En una antropología que literalmente podría llamarse de segundo orden, comenzó una fase que, vista desde nuestros días, se revela como un momento de renovación compulsiva de las metáforas-raíces.

A través de libros y sobre todo de congresos, como los encuentros de Royaumont y de Cerisy, comenzó a germinar y a propagarse entre los antropólogos franceses que formaban parte de la línea autodenominada "dinámica" (derivada de Georges Balandier, René Girard y Max Gluckman), entre los adversarios del estructuralismo y en sus análogos sociológicos. La corriente dinámica se llamaba así, sin duda, para tomar distancia de la concepción estática, sincrónica, propia del estructuralismo de Claude Lévi-Strauss y de los diversos funcionalismos. Y es precisamente su inclinación procesualista, su énfasis en el cambio (y también, convengamos, su carencia de un marco teórico viable), lo que la convirtió en el frente de menor resistencia y el cauce natural para la irrupción de las ideas relativas a sistemas alejados del equilibrio, condimentadas con un toque de posestructuralismo. El estructuralismo dejaría de ser la corriente de elección obligada, cediendo paso a una visión de diacronía irreversible, que contaría además con el apoyo táctico, con leves reservas, de Dan Sperber, Maurice Godelier, Luc de Heusch y Pierre Smith, en algún momento tributarios de Claude Lévi-Strauss.

Un puñado de textos jalonan este proceso: *La place du désordre, critique des théories de changement social* del ultraliberal Raymond Boudon (1984), el cual favorece una posición que recupera y reivindica, a contrapelo del holismo sistémico, el papel de un sujeto rabiosamente individual; *Ordres et désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*, de Jean-Pierre Dupuy (1982), de tono casi profético, particularmente en sus capítulos sobre "la ciencia de la autonomía" y "la simplicidad de la complejidad"; *La pluralité des mondes* de Francis Affergan (1997), que anuncia que el rígido concepto de modelo ha perdido pertinencia, cediendo terreno a la noción de acontecimiento, la cual permite construir los esquemas loca-

les, las estructuraciones nativas, las situaciones de la enunciación; y *L'Ordre improbable, entropie et processus sociaux*, de Michel Forsé (1986). Jean-Pierre Dupuy se hizo conocer más tarde en el mundo angloparlante como crítico de la primera cibernética y la ciencia cognitiva (en realidad se trata del programa fuerte de la Inteligencia Artificial), afirmando que la literatura es la forma más excelsa del conocimiento y que "la existencia de un nivel simbólico que está estructurado como un lenguaje y que opera como una máquina no resiste el menor análisis" (Dupuy 2000). Devenido un libro esencial porque no hay otros sobre el tema, el trabajo de Dupuy no soporta una lectura rigurosa: no traza adecuadamente el contraste entre el cognitivismo simbólico y el paradigma conexionista, estima improductivas líneas de investigación que resultaron ser fructíferas, e ignora la diferencia entre la segunda cibernética y la cibernética de segundo orden.

El estudio de Forsé, a su vez, es característicamente expresivo porque en lugar de concebir los sistemas vivientes (como hacía Prigogine) o las sociedades humanas (como lo intentó Richard Adams) como estructuras disipativas que contradicen la tendencia de los sistemas físicos a la entropía creciente, Forsé integra la sociedad al universo material e imagina, termodinámicamente, un porvenir de máximo desorden, en el cual desaparecerán las jerarquías, las diferencias, las estructuras, las obligaciones implícitas o explícitas. Complementario al primer cuadro en el que ilustrábamos las oposiciones entre información y entropía, la tabla 2.5 especifica las categorías que hacen que Forsé tome partido en la contienda cósmica, y opte con firmeza por encomiar la propensión al desorden. Las mismas palabras que Forsé ha escogido para contrastar las opciones disponibles empujan la elección en un sentido que busca resonar con las fibras más nobles de las ciencias humanas; sólo falta *fraternité* para que el cuadro, sólo en apariencia paradójico, resuelva más allá de toda discusión quiénes son los buenos en esta disputa. Ni falta hace decir que el esquema de Forsé confunde el sentido político coloquial de las palabras con los significados técnicos y funda su visión futurista y panglossiana en esa confusión.

Orden	Desorden
Desequilibrio	Equilibrio
Heterogeneidad	Homogeneidad
Desigualdad	Igualdad
Coacción	Libertad
Inestabilidad	Estabilidad

Tabla 2.5 - Oposiciones de Michel Forsé

Desde mediados de la década de 1980, Georges Balandier, ya bastante alejado de su antropología política y políticamente correcta de los 60, se mostró fascinado por las teorías del caos y por el pensamiento de Prigogine. En un libro munido de tres niveles escalonados de titulación, *El Desorden. La Teoría del Caos y las Ciencias Sociales. Elogio de la fecundidad del movimiento* (1989), Balandier ha puesto estas novedades teóricas en línea con el pensamiento posmoderno en general. Para Balandier, las ciencias sociales actuales "conocen la penitencia", "están condenadas a reformarse", "interrogan su propio saber"; y en su refiguración han de renovar sus analogías, en consonancia con la visión de Clifford Geertz, alejándose de máquinas complejas y organismos, y acercándose a las metáforas del juego, el drama o el texto, maravillas de las que sin embargo nunca más vuelve a hablarse (Balandier 1989: 60).

Balandier se congratula de que se desalienten todas las viejas pretensiones de comprensión global de lo social, toda formulación teórica unificante, y encuentra en Prigogine, vulgarizado por Stengers, el acicate para formularlo de esta manera:

> Ya no son más primero las situaciones estables y las permanencias lo que nos interesa, sino las evoluciones, las crisis y las inestabilidades…, ya no más sólo lo que permanece, sino también lo que se transforma, las alteraciones geológicas y climáticas, la evolución de las especies, la génesis y las mutaciones de las normas que actúan en los comportamientos sociales (Balandier 1989: 61).

Pese a ser en extremo locuaz, el texto de Balandier es, por decirlo de algún modo, sistemáticamente impreciso. Por empezar, su propósito discursivo es incierto; nunca se sabe cuál es la demostración que está en juego, ni en nombre de quién se expresa. Su prédica o bien perpetra ataques a posturas que nadie defendería, como el determinismo social, la "armonía newtoniana" o el desdoblamiento lévistraussiano de sociedades frías y calientes; o comenta textos fusionando lo que dicen otros pensadores con su propia corriente de conciencia; o encuentra tantos precursores, prefiguraciones truncas y anticipos superados de las nuevas ideas (en Durkheim, en Marx, en Comte, en Gurvitch y hasta en Saint-Simon) que uno acaba preguntándose qué es lo que ellas puedan tener de novedoso, y por qué si eso es tan exiguo Balandier despliega tanto entusiasmo.

Una y otra vez entremezcla caos con desorden, incertidumbre, ambivalencia, inversión (o retrogradación), crisis de la representación, descrédito de los grandes relatos, interpretación geertziana, entropía, incompletitud gödeliana, auto-organización, improbabilidad, bifurcación, movimiento, arbitrariedad, deconstrucción, acontecimiento, singularidad. Lo mismo da y lo mismo vale, en tanto suene actual y transgresor; alcanza con que esas nociones suministren pretextos para proclamar periódicamente, como llevando a cabo un rito de confirmación, que las epistemes ahora aceptables promueven la bancarrota de la mecánica, el reduccionismo y la objetividad. Balandier ni siquiera se pregunta cuál es la razón última que otorga un aire de familia a todas aquellas ideas heterogéneas, amontonadas aquí más por las resonancias seductoras de sus nombres que por la equivalencia formal de sus denotaciones o por su concordancia ideológica. Esta cita da testimonio de su lectura enrarecida y rapsódica de un registro teórico complejo:

> La idea de bifurcación también puede ser traspuesta y ya se ha utilizado. Esta idea limita la influencia de los determinismos sociales, permite situar puntos de libertad, identificar posibles. Las sociedades de la modernidad más acelerada comienzan a ser consideradas como sociedades de bifurcaciones, la selección de los posibles se haría progresiva y sucesivamente, a la manera en que se realiza un recorrido de encrucijada en encrucijada hasta llegar a un final todavía desconocido. La necesidad, la de la evolución y aún más la de la revolución, desaparece en cuanto transformación ineluctable y global, para ceder el lugar a las realizaciones de lo social más inciertas y más locales (Balandier 1989: 80),

Detrás de una prosa elaborada se esconde una epistemología cándida y unilateral que a veces juega con trampa y otras, las más, se entrampa ella misma en el espesor de una nomenclatura que le hace creer que el "encanto" de los protones se asemeja a una especie de delicada finura, que es signo de sagacidad pensar la materia inerte en términos antropomórficos, o que los grados de libertad de torbellinos y bifurcaciones tienen alguna equivalencia con las libertades públicas y civiles de los ciudadanos (p. 41; p. 58 n. 2; p. 80). A ninguna analogía dedica un examen de más de un par de renglones, como si su fuerza enunciativa tuviera un límite y un respaldo de esa magnitud.

Los autores desencantados de sus progresismos juveniles suelen, por necesidad estructural, adoptar posturas discutibles pero consistentes, como por otra parte lo son todos los fundamentalismos. Esta es una excepción ejemplar y reveladora. Conozco pocos textos tan atestados de contradicciones involuntarias: el evolucionismo, reivindicado en algún momento porque Prigogine y Stengers lo reputan una idea esencial para la nueva alianza (p. 61), es impugnado poco más tarde porque en cierta antropología esa palabra apesta (p. 80). En un párrafo se condenan los modelos antropológicos emanados de la física y la biología, de la máquina compleja o del organismo por sujetar las ciencias humanas a las naturales (p. 60), y en la página siguiente se rinde homenaje a los isomorfismos que provienen de la geología, la meteorología, la astronomía o las ciencias de la vida porque promueven exploraciones extraterritoriales entre pensadores audaces que se arriesguan más allá de las fronteras de su saber (p. 61). Respecto de estas aventuras por otros territorios Balandier no sabe si repudiarlas o colmarlas de alabanzas: por un lado asevera que la buena ciencia actual ha abandonado toda ilusión de extraterritorialidad teórica porque se ha dado cuenta que sus proposiciones son poco separables del medio en que son enunciadas (p. 40); por el otro, afirma que los teóricos de la nueva ciencia que llevan los modelos de Prigogine fuera de su dominio propio traspasan los límites establecidos con formulaciones que han tomado el lugar de los "grandes relatos" de no hace mucho, contribuyendo así a la renovación de toda marcha científica, cualquiera sea su objeto (p. 52, 61). Aún cuando se quiera estar de acuerdo con Balandier, nunca se sabe si piensa una cosa o exactamente la contraria.

Acaso la clave del nuevo discurso de Balandier radique en la alusión velada que se desliza en la última frase de la cita transcripta más arriba y en su actante implícito, una revolución que ha dejado de ser imperiosa en el mundo naciente proclamado por las triunfantes teorías del desorden, en las que no parece haber nada que despierte dudas, que sea difícil o que funcione mal. Lo que allí resuena no es más que un eco del mandato posmoderno que estipula que, de todos los metarrelatos legitimantes que ahora están en crisis, el materialismo histórico es el primero que merecería ser abolido. Uno evitaría perder el tiempo con lecturas superfluas si Balandier y tantos otros culposos a su lado hubieran escrito solamente: "Yo ya no soy de izquierda, y eso es todo lo que tengo que decir".

2.5.8 – La investigación social de segundo orden

Debido a su carácter proactivo, palabrero y entusiasta, habrá que mencionar entre las modalidades de aplicación de la cibernética tardía en las humanidades un conjunto de posturas autodenominado "investigación social de segundo orden". Igual que sucede en las ciencias sociales de la complejidad en Francia, sus elementos constitutivos incluyen dosis variables y diluidas de teoría de las estructuras disipativas, una fe declarada en la autopoiesis de Varela y Maturana, así como en los sistemas reflexivos de Gordon Pask, algo de fractales y teoría de catástrofes, un poco de la galaxia-complejidad de Edgar Morin y de sociología compleja de Jean-Pierre Dupuy, fragmentos de posmodernismo rhizomático, la infaltable lectura irracionalista de la prueba de Gödel y del principio cuántico de indeterminación de Heisenberg, así como una abundante proporción de constructivismo radical y un propósito recurrente de integrar sujeto y objeto (o abolir este último de una vez por todas). Nótese que los movimientos celebrados en este campo mapean sobre las escuelas que forman parte del circuito autopoiético-constructivista-posmoderno, sin dejar ninguna fuera del cuadro.

Los representantes más notorios de esta corriente parecen ser Jesús Ibáñez, Pablo Navarro, Rafael Manrique Solana, Francisco Martínez, Alfonso Ortí, el psicoanalista Paco Pereña, José Luis de Zárraga y Fernando Conde (Ibáñez 1990). Practicantes adscriptos son Julio Mejía Navarrete en Perú y Dimas Santibáñez en Chile; el nombre de los simpatizantes es legión. Ibáñez, el carismático sociólogo autodidacta fallecido en 1992, ha sido sin duda su caudillo. Aunque no existe un solo concepto nuevo y memorable que haya sido elaborado en el interior de esta escuela, y toda la novedad consista en la apropiación y ensamblado de ideas provenientes de otras partes, la autoimagen de esta práctica es la más encomiástica que puede encontrarse en el espectro de las ciencias de la complejidad. Esa autoimagen deriva menos de sus méritos intrínsecos que de la negación irónica de las doctrinas contrarias. Su discurso se agota en una diatriba constante en contra del determinismo mecanicista, de la primera cibernética y de las matemáticas clásicas, enfatizando su contraste con la visión liberadora y la misión trascendente de evangelización que se supone encarnan los miembros del grupo.

El rasgo característico de sus razonamientos es la propensión a encuadrar cada teoría, las propias así como las ajenas, conforme a una matriz de juicios de valor políticos y morales. Esta axiología se administra metonímica y metafóricamente, a menudo en función de los nombres de las escuelas, los métodos y los conceptos: de esta manera, por ejemplo, "caos" es para estos autores siempre bueno, mientras "determinismo" es siempre abyecto; les resulta loable el espacio liso de la geometría fractal que permite desplazarse donde uno quiera, mientras que creen nefasto el espacio estriado de la geometría euclideana que define trayectorias obligadas; y así sucesivamente.

Malo	Bueno	Referencia (Ibáñez 1990)
Estructuralismo clásico: Piaget, Greimas, Lévi-Strauss	Estructuralismo no clásico: Kristeva, Morin	Ibáñez, p. 19
Pensamiento simple del objeto	Pensamiento complejo del observador	Ibáñez, p. 10
Ciencia del control (primera cibernética)	Control de la ciencia (segunda cibernética)	Pablo Navarro, pp. 23-27
Paradigma de simplificación = dictadura	Paradigma de complejidad = democracia	Ibáñez y Dupuy, p. 8
Máquinas alopoiéticas	Máquinas autopoiéticas	Ibáñez, p. 11
Teoría de la forma = geometría del Mal	Teoría de catástrofes = Geometría del bien	Ibáñez, p. 16
Algebra, formalismo, Bourbaki, cuantitatividad, escritura alfabética	Geometría, intuicionismo, Poincaré, cualitatividad, escritura pictográfica	Ibáñez, p. 15
Newton, curvas continuas y derivables, fuerzas	Thom y Mandelbrot, curvas discontinuas y no derivables, formas	Ibáñez, p. 15
Geometría tradicional, espacios estriados	Geometría fractal, espacios lisos	Ibáñez, p. 17
Paradigma de simplicidad, lenguaje con énfasis en el sustantivo	Paradigma de complejidad (Bohm), lenguaje con énfasis en el verbo	Ibáñez, p. 20
Mecánica clásica, sujeto absoluto	Mecánica cuántica, sujeto reflexivo	Ibáñez, p. 34-35, Pask, p. 36-40
Cuantitatividad, bivalencia	Cualitatividad, multivalencia	Ibáñez, p. 46

Tabla 2.6 - Dicotomías de la investigación social de segundo orden

En la tabla 2.6 he puesto algunos ejemplares seleccionados de este reparto pareado de premios y castigos; pienso, de todos modos, que la crudeza de este maniqueísmo metodológi-

co, evocativo de las antítesis de Michel Forsé, trasunta el mismo género de ardores adolescentes y expresiones de deseos que otros científicos más circunspectos albergan pero se esfuerzan por reprimir. En este sentido, la investigación de segundo orden es, por su incontinencia, reveladora del pensamiento íntimo de la corporación que se ha constituido en torno a los discípulos indirectos de Prigogine. Tan absorta está la escuela en su dualismo, que deja de percibir la dicotomía que existe entre (*a*) la dinámica no lineal y la teoría del caos y (*b*) la metafísica constructivista, solipsista y anticientífica con la que ha establecido compromiso. Aunque ella misma rinde culto a un izquierdismo indefinido, tampoco ha caído en la cuenta de las conocidas implicancias retrógradas del relativismo autopoiético y constructivista, tanto en materia de ciencia como de ideología (véase Zolo 1986; 1990; Berman 1989; 1996; O'Hara 1995; Hayles 1995; 1999; Wolfe 1995; Huneeus e Isella 1996).

La escuela del segundo orden no es creativa ni siquiera en los errores reiterados que les son propios: sostiene que el caos es simplemente lo aleatorio (Ibáñez 1990: 10); que la geometría fractal es "la geometría del azar" (p. 9); que la autopoiesis constituye una exploración profunda de la complejidad; que es necesario tolerar el solipsismo constructivista y la negación de la realidad con tal de restar apoyo al conductismo; que la topología de Thom es geométrica y que es no determinista (p. 16), y que sus curvas son discontinuas y no derivables; que las bifurcaciones son privativas de los sistemas no-deterministas (p. 9); que "el azar es el límite de la ciencia" (p. 10) pero que de algún modo "las estructuras disipativas son el instrumento más poderoso para ver y *manejar* el azar" (p. 9).

Algunas aseveraciones contradicen hechos bien conocidos y se refutan solas; otras merecen una réplica. El caos no guarda relación con el azar y está muy lejos de ser indeterminista; la especialidad que lo estudia (al igual que su objeto) se llama "caos determinista" (Li y Yorke 1975; Nicolis y Prigogine 1989; Strogatz 1994: 323; Leiber 1998). Las bifurcaciones y las catástrofes surgen típicamente en sistemas deterministas, y René Thom es famoso por haber sido el más ferviente determinista de los últimos tiempos, al punto de haber escrito un artículo incendiario para *La querelle du déterminisme* cuyo título original fue "Halte au hasard, silence au bruit, et mort aux parasites!", que fuera respondido con indignación por Edgar Morin (Thom 1980; 1990; 1997: 137-138; Spire 2000: 84; Morin 1984: 111-134). Refiriéndose a las filosofías de Monod, Atlan, Morin y Prigogine-Stengers, escribe por ejemplo Thom:

> Todas glorifican ultrajantemente el azar, el ruido, las fluctuaciones, todas hacen a lo aleatorio responsable bien sea del origen del mundo, … bien sea de la emergencia de la vida y del pensamiento sobre la tierra. … [Este pensamiento] procede de un cierto confusionismo mental, excusable en autores de formación literaria, pero difícilmente perdonable en sabios diestros en principio en los rigores de la racionalidad científica (Thom 1980: 120).

Tampoco impera el azar en los fractales, que surgen de la iteración de una función que usualmente carece de todo elemento aleatorio; los fractales estocásticos (plasmas, difusión) son pocos, atípicos y derivativos. No hay nada en el espacio liso de los fractales, además, que permita caminar a donde uno quiera, sea lo que fuere lo que signifiquen ambas expresiones: el resultado de la aplicación de una fórmula fractal es lo que la función *determina*, no lo que al observador se le antoja. Menos aún hay reflexión alguna sobre complejidad en la literatura originaria de la autopoiesis, doctrina que, al contrario de lo que a Ibáñez conviene, sostiene un severo y prosaico determinismo estructural (Maturana y Varela 1973; 1987; Maturana 1980; 2004: 24-26).

En su premura, los teóricos de la escuela catalogan del lado equivocado a Piaget, quien si bien escribió sobre estructuralismo fue, lejos, el primer constructivista; confunden siempre geometría con topología, la cual no es métrica; sostienen que la cibernética clásica creía que la información era una sustancia (Ibáñez 1990: 24), cuando es evidente que la trataba como medida; alegan que la incompletitud implica que "la verdad de una proposición es relativa a los axiomas que fundan una teoría" (p. 35), enunciado que no cuadra con ninguna lectura admisible de la prueba de Gödel; alientan la idea del "control de la ciencia" (pp. 23-27) sin especificar cuales serían las instituciones y personas que la ejercerían o los criterios que habrían de aplicarse en esa operación de policía; consideran compatible la tipificación lógica de Russell, que prohíbe la autorreferencia, con la recursividad, que se define a partir de ella (p. 106); y, en el clímax de su pedagogía surrealista, interpretan mal la función para generar el conjunto fractal de Mandelbrot, afirmando sin error de imprenta posible que $2^2+2=5$ (p. 83). A lo largo del texto se afirma que el principio de indeterminación es aplicable al mundo macroscópico y a la sociedad, y que existe afinidad entre la cuántica y la ciencia del caos; en la vida real, sin embargo, los principales caólogos y complexólogos (Mitchell Feigenbaum, Stuart Kauffman, Per Bak, George Cowan, Melanie Mitchell) no sienten ni interés ni aprecio por el estudio de las partículas elementales o por sus teorías distintivas, a las que creen encaminadas a erigir la gran "teoría de todo" (Horgan 1998: 259-260, 282-283; Thom 1997: 137; Kauffman 2000: 248, 250).

Esta última observación merece al menos una aclaración parentética. En el SFI, en particular, prevalece la creencia de que la mecánica cuántica, las partículas subatómicas y las entidades unificadoras como las supercuerdas, conducen a una visión reduccionista y analítica, propia de las ciencias convencionales de la "simplicidad" (Waldrop 1992: 348-349; Gell-Mann 2003: 29). Reducir a partículas elementales se estima tan reduccionista como reducir a entidades de la física clásica, organismos o individuos (Laszlo 1997: 93). Tampoco hay en la cuántica la menor traza de complejidad caótica propiamente dicha. Como dicen los físicos que han trabajado la cuestión, resulta irónico que las ecuaciones de la teoría cuántica hasta el momento no hayan revelado caos alguno. La ecuación clásica de Schrödinger para la función de onda se refiere a una amplitud de probabilidad, pero es determinista, no caótica e incluso, como señalaron Prigogine y Chirikov, temporalmente reversible (Pagels 1991: 82-83; Stenger 1995; Prigogine y Stengers 1998: 140; Hilborn 2000: 498-499). Puede que a escala subatómica sucedan cosas desconcertantes, pero la cuántica es estrictamente una mecánica (como su nombre lo indica) y sus ecuaciones características son casi todas lineales. En suma, el nivel cuántico es uno de los pocos lugares del universo donde nunca se encontró caos, y el caos determinista es un espacio de fenómenos sobre el que la mecánica cuántica no tiene jurisdicción. Quien admite la relevancia de la mecánica cuántica para el mundo social admite además, sin atenuantes, el principio de reducción. Cierro el paréntesis.

El error categórico de la investigación social de segundo orden, empero, es haber olvidado que la misión de un paradigma no es despedazar las doctrinas rivales, sino refinar el conocimiento de su objeto, o como quiera se lo desee llamar. Si lo que ellos pretendían era fusionar sujeto y objeto, debieron darse cuenta que no eran Thom, Prigogine, Atlan o Luhmann compañeros de ruta avenidos a colaborar. Hay en su modelo una falta más fundamental todavía, que es la de desconocer lo que se cuestiona y conocer precariamente lo que se enseña; tras un despliegue de impericia como el que se ha entrevisto, no me parece que esta corriente posea autoridad intelectual para decretar que los científicos que no comulgan con su evangelio son "muy tontos", piojos extraviados en la pelambre de sus predecesores (Ibá-

ñez 1990: 3). Considero problemático no tanto que esta postura haya sido formulada y esté disponible, sino que investigadores en las ciencias blandas que no han tenido acceso a la formación técnica requerida la encuentren aceptable y la hagan suya.

No hay mucho más que decir de esta escuela, que representa una actitud que otorga justicia a quienes piensan que las teorías de la complejidad son una micromoda efímera a la que se presta una atención mayor a la que merecen sus logros. En el furor de su desprecio por la ciencia clásica estos investigadores no han advertido que su modelo carece de una implementación que haya probado más allá de toda duda razonable la fuerza de sus métodos, que tampoco queda claro cuáles son. La lección epistemológica que han dejado estos estudiosos (cuyo proyecto parece ya discontinuado) no es que ellos en particular hayan sido incoherentes, sino que sus incoherencias son ejemplares de una clase: no hacen más que poner de manifiesto el despeñadero en que se precipitan los abordajes discursivos cuando las teorías complejas se usan para convalidar ideas que son, en el fondo, abismalmente simples.

2.5.9 – La sociología autopoiética de Niklas Luhmann

De todas las apropiaciones de teorías sistémicas en ciencias sociales, ninguna es tan monumental, laberíntica y explícita como la del alemán Niklas Luhmann, fallecido en noviembre de 1998. Junto a ella, empequeñecen otros intentos de uso de teorías sistémicas en sociología, como la de su connacional Peter Hejl. Sin embargo, trataré muy brevemente este particular, porque guarda una relación sólo periférica con las temáticas de la complejidad, por más que el propio Luhmann haya creído, al empuje de complicaciones argumentativas que hablan de procesos autorreferenciales, reflexividad y causaciones circulares, que tanto su objeto como su paradigma eran complejos en el sentido técnico de la palabra.

Los aportes de Luhmann a la teoría sociológica comprenden una gigantesca construcción de teoría pura que se expande a lo largo de treinta años, en la que sucesivamente va agregando conceptos procedentes de diversos modelos sistémicos. Sus primeras experiencias con estas teorías se refieren primero al funcionalismo pre-sistémico de Talcott Parsons, con quien estuvo en contacto en Harvard en el curso de 1960-1961. Luego incorporaría ideas de la TGS y la primera cibernética, de las que Luhmann toma (1) el principio de la generalidad de su formulación (2) la convicción en la validez y necesidad de las proyecciones transdisciplinarias y (3) el reconocimiento de la complejidad y diferenciación de lo social y la necesidad de reducirlas, aunque lo que se termina constituyendo vaya a ser un edificio teórico de extrema complicación.

Más tarde, a partir de su contacto con la "cibernética de la cibernética" de Heinz von Foerster, Luhmann comienza a utilizar conceptos que se concentran en el estrecho arco que va desde la autopoiesis al constructivismo radical, aunque sin llegar al extremo ontológico de negación de la realidad que es peculiar de éste. A lo que más se atreve es a un construccionismo moderado, semejante al de la sociología norteamericana (centrado en la construcción social de la realidad, en este caso del orden social mismo) identificando ese proceso de auto-construcción con la autopoiesis. En cuanto a la ontología de los sistemas, Luhmann no duda en afirmar que, más allá de que sean postulados por un observador, los sistemas *existen* (Luhmann 1998: 13). Tampoco admite que la diferencia sistema/entorno sólo sea accesible a un observador, tesis que considera irritante (p. 174), o que el investigador esté en libertad de determinar subjetivamente los límites de su objeto (p. 175). Luhmann no comparte el irracionalismo de algunas de sus fuentes de influencia; para él la verdad es el medio de

comunicación de la ciencia, igual que lo es el dinero para la economía (Luhmann 1982; Price 1997: 7).

La obra que mejor representa la visión de Luhmann es *Sistemas sociales* (1998), publicada en Frankfurt en 1984. No discutiré en este estudio el conjunto de las teorías luhmannianas, pues eso nos alejaría demasiado del tema específico de este libro; en todo caso, Luhmann no ha creado ninguna categoría distintiva, sino que ha trasladado ideas de una disciplina a otra. La productividad de la apropiación del concepto de autopoiesis, por otra parte, sólo podría evaluarse a la luz de la teoría sociológica, de la cual tengo apenas una somera idea de conjunto que no me califica para tratar el asunto con la profundidad que sería menester. En consecuencia, me limitaré a señalar dificultades que algunos sociólogos de profesión han encontrado en su modelo, escogiendo las observaciones de carácter técnico antes que las impugnaciones fundadas en desacuerdos de ideología. De todas ellas, además, sólo me ocuparé de las que guardan relación con las teorías de la complejidad.

En primer lugar, el mismo Francisco Varela, como ya se ha dicho, estimaba impropia la extrapolación de la idea de autopoiesis al estudio de lo social. Su argumento es que las instituciones sociales no son autopoiéticas, sino autónomas (Varela 1979: 54-57). Él considera la autopoiesis como un caso distinto de autonomía en el cual un sistema produce sus propios componentes (es decir, su estructura), siendo la producción química de los sistemas vivientes el caso paradigmático. Varela aduce que "… parece muy forzado describir las interacciones sociales en términos de producción de componentes" (1981a: 15), dado que

> … las clases de relaciones que definen unidades tales como una empresa … o una conversación … se capturan mejor mediante operaciones que no son producciones. Tales unidades son autónomas, pero con una clausura organizacional que es susceptible de caracterizarse más bien en términos de relaciones tales como instrucciones y acuerdo lingüístico (Varela 1981b: 38).

Las reservas de Varela se originan en definiciones que él mismo ayudó a crear, y no es descabellado imaginar que son un disparo por elevación a las ideas tardías de Maturana, quien tomó una dirección más preocupada por la cognición como epifenómeno o precondición de la experiencia, que por los agentes cognitivos representados en modelos de redes y autómatas (Varela 1990; Maturana 1996; Varela 2004: 55-56). Varela usó muy poco el concepto de autopoiesis en la última década de su vida porque encontró que conducía al solipsismo. La crítica de la representación que había formulado con Maturana la reemplazaba por una alternativa débil: lo externo como mera perturbación; ésta no es una alternativa constructiva, piensa Varela, pues deja la interacción en la bruma. Cuando los críticos denuncian solipsismo su argumentación tiene entonces "un cierto mérito" (Varela 2004: 56). Como sea, Varela afirma que la producción de sus propios componentes por una unidad autopoiética le proporciona un límite topológico delineado en el espacio en que se realiza. La existencia y carácter de ese límite es uno de los criterios formales para atribuir autopoiesis a un sistema (Varela, Maturana y Uribe 1974). Los sistemas sociales no exhiben semejante límite, y esta ha sido la objeción que se ha interpuesto a la atribución de autopoiesis a los sistemas sociales (Kenny 1992; Mingers 1994). Cuestionando los usos metonímicos de la autopoiesis en la sociología de Luhmann y en la terapia familiar sistémica escribe Varela:

> Ha habido intentos repetidos de caracterizar, por ejemplo, una familia como un sistema autopoiético. … Estos intentos se basan, en mi opinión, en un abuso del lenguaje. En la idea de *autopoiesis* las nociones de red de producciones y de frontera tiene un sentido más o me-

> nos preciso. Cuando la idea de una red de procesos se transforma en "interacciones entre personas", y la membrana celular se transforma en el "borde" de un grupo humano, se incurre en un uso abusivo (Varela 2004: 51).

Mi percepción es que todos admiten la relevancia de estas impugnaciones y entienden que son definitorias; pero a nadie se le ha ocurrido sacar de esa refutación las debidas conclusiones, y al propio Varela el impacto halagador de sus ideas en las ciencias sociales, al lado del fracaso de la autopoiesis, la enacción y la neurofenomenología en biología y en ciencias cognitivas, le hizo silenciar paulatinamente sus mociones de censura, llegando a elogiar el uso que hicieron del concepto J.-P. Dupuy o W. I. Thompson. Por otro lado, lo que resulta anómalo en el campo de las teorías de la complejidad es que exista un modelo teórico (la autopoiesis) que sólo se aplica a una clase circunscripta de objetos. Nótese que Luhmann jamás cita palabras varelianas o menciona a Varela en su obra mayor, salvo para reconocer, una sola vez, que el concepto de autopoiesis fue propuesto por él y Maturana (Luhmann 1998: 56). Jamás habla tampoco de los sistemas autopoiéticos en términos de máquinas. Sucede como si repudiara, hasta el punto de la irritación, ciertos significados, implicancias y fundamentos de los conceptos que ha escogido utilizar (pp. 13, 174, 175). El desprecio es recíproco: se sabe que Maturana rechazó explícitamente ser citado por Luhmann como una de sus fuentes de inspiración (cf. http://en.wikipedia.org/wiki/Niklas_Luhmann).

Otros críticos (Charles Fazzaro, Jürgen Habermas, Ignacio Izuzquiza, Rodrigo Jokisch, Max Miller, John Minger, Wallace Provost, Stefan Rosbach, Alex Viskovatoff, Gerhard Wagner, Danilo Zolo), han formulado objeciones de variada solidez y relevancia al modelo luhmanniano. Los cuestionamientos de mayor entidad atañen a la falta de poder explicativo de la autopoiesis: en ella se definen descriptivamente límites topológicos y nudos de interacción circular, pero no se explicitan los mecanismos de mantenimiento, organización o reproducción, ni se demuestran los procesos de emergencia. También se ha señalado que la concentración de Luhmann en las comunicaciones enmascara el hecho de que su análisis ignora la noción de lenguajeo propuesta por Maturana y excluye a los interactores individuales de toda consideración, al dictado de una filosofía totalizadora que sin duda es herencia de su contacto con la Gran Teoría de Parsons. Esta circunstancia es tratada por Varela (1979: 85) al describir las características del acto cognitivo fundamental de la distinción. Varela dice que la demarcación de un sistema se contextualiza de acuerdo con el observador que la efectúa. En el modelo de Luhmann tal posición se da por sentada, no se sabe bien cómo engrana en el conjunto y el papel del sujeto se diluye, pues el marco es de escala macroscópica. ¿Cómo es posible entonces que una estrategia referencial que implementa una teoría que enfatiza al observador genere un punto de vista para el cual tal observador es irrelevante? Hasta que esta cuestión no se resuelva, afirman los críticos, la aplicación de la autopoiesis a los sistemas sociales debe considerarse menos que plenamente lograda.

El "filósofo no lineal" Wallace Provost (1985) ha demostrado también la falta de una teoría de la complejidad adecuada en la obra magna de Luhmann. Al decir éste que la formación de los sistemas sociales se logra mediante la reducción de la complejidad (escogiendo entre una proliferación de posibilidades) y que esa formación incrementa la complejidad de modo que los sistemas más ricos son los que mejor afrontan la complejidad de sus entornos, se precipita en un atolladero. En estas condiciones, la complejidad acaba siendo lo mismo que la variedad total de interconexiones entre las entidades de un sistema: cuanto más rico el patrón de interconexiones, mayor el nivel de complejidad. Luhmann limita este uso a la variedad de decisiones sociales: "Por complejidad entendemos el número de posibilidades a

partir del cual, a través de la experiencia y la acción, podemos elegir ya sea mediante la reducción estructural o la toma de decisiones conscientes". Sin embargo, tratar la complejidad en términos de una masa de simple variedad numérica da por resultado una estrategia que trata la complejidad y la variedad como términos idénticos y redundantes. Como nota al pie de la crítica de Provost, señalo que en el pensamiento de Luhmann hay proporcionalidad entre lo mucho y lo complejo: es ésta una idea profundamente lineal.

Debo decir que tampoco hay concordancia entre el tratamiento que Luhmann hace de la complejidad y el sentido que ésta tiene hoy en las ciencias de la complejidad y el caos. El criterio luhmanniano de complejidad es convencional y, en el mejor de los casos, de corte estadístico. Los conceptos de no linealidad y recursividad no figuran en su temario y el de emergencia no está desarrollado, si se deja de lado una observación sobre el conocimiento como realidad emergente (Luhmann 1998: 431) y una calificación al pasar del sistema social como orden emergente (p. 119), nada de lo cual agrega gran cosa a la idea de cultura como emergente superorgánico que propusiera el antropólogo Alfred Kroeber en 1917.

Dado que las teorías que se inspiran en la autopoiesis y en la cibernética de segundo orden adoptan un protocolo que difiere del lenguaje científico usual, el intercambio con campos del saber que quedan fuera de su círculo acostumbra ser débil y embrollado. No hay, por así decirlo, acoplamiento estructural posible cuando los nodos del intercambio están sujetos a requisitos de clausura operacional. Esta circunstancia hace que Luhmann, por ejemplo, no tome en cuenta la literatura técnica disponible y asegure que el concepto de complejidad no ha sido jamás definido (p. 47). La gratuidad de este juicio es notoria y característica: es su propio campo, el autopoiético, el que no ha integrado ese concepto. Más adelante he consignado alrededor de cincuenta procedimientos de medida de la complejidad que son de uso común y conocimiento público en el espacio interdisciplinario; la bibliografía compilada al respecto por Bruce Edmonds en Manchester en 1997 incluía 386 entradas, y distaba de ser completa. Muchas de esas métricas de la complejidad implican definiciones suficientemente precisas y estaban disponibles cuando Luhmann escribió su libro. Ya sea que se eche la culpa a la exigüidad de sus lecturas o al escorzo sectario de las doctrinas en que se basa, hay que concluir que es él entonces, y no la ciencia, quien carece de una visión sistemática de la complejidad como problema, empezando por su definición.

Por otra parte, para Luhmann la complejidad es inherente a la realidad social antes que al plano teórico (p. 49); la única opción operacional es, por ende (igual que lo era en la TGS), la reducción de la complejidad, para la cual no establece tampoco ningún camino metodológico concreto (pp. 48, 50, 75, 84, 164, 168, 176). Cuando se examina su idea de complejidad se comprueba que unas veces se vincula mecánicamente con la cantidad de alternativas y otras está ligada a la indeterminación (pp. 50, 165); ambos gestos son más propios de concepciones analíticas, estadísticas, no sistémicas, que de las formas epistémicas que contemplan principios de emergencia, auto-organización y no-linealidad. Su escala de complejidad parece susceptible de ser tratada intuitiva o manualmente, pues en ningún momento Luhmann manifiesta que se requiera instrumentar alguna clase de algoritmo o herramienta de modelado. El concepto de complejidad está mejor elaborado en obras luhmannianas muy anteriores, donde se la define como el problema frente al cual la construcción de sistemas constituye una solución (*Die Praxis der Theorie*, 1969, p. 261); pero como no hay un concepto formal y refinado de complejidad en la literatura autopoiética, en su teoría más reciente complejidad y autopoiesis no encuentran la manera de relacionarse cabalmente.

Encuentro sintomático que las exploraciones sociológicas de la complejidad en el mundo de habla inglesa no estimen necesario mencionar el nombre de Luhmann o lo hagan sólo de cuando en cuando (Eve y otros 1997; Kiel y Elliott 1997; Harvey y Reed 1997; Byrne 1998). Pero a pesar de las copiosas críticas y al hecho de que en los últimos años sufre bastante mal la competencia originada en la adquisición de las nuevas teorías por su propia disciplina, la concepción de Luhmann está llamada a perpetuarse como una referencia obligada para una sociología (de tradición europea) preocupada por la complejidad y carente de propuestas comparables. Nadie más ha intentado después redefinir toda una ciencia social en función de un modelo articulador de tamaña envergadura; tal vez sea una proeza que ya no resulte prudente, ni posible, ni necesario acometer. La grandiosa construcción personal de Luhmann quizá vaya a ser la última manifestación de su especie y sólo eso ya la hace destacable. No creo que a la larga importe mucho que su robustez metodológica pueda ponerse ocasionalmente en tela de juicio.

2.6 – Teoría de catástrofes

2.6.1 – Singularidades: estabilidad estructural y morfogénesis

Aunque no se trata en rigor de una teoría sistémica de la misma índole que las revisadas, la teoría de catástrofes (TC) comparte con las estrategias que aquí se discuten su aspiración de generalidad, su interés por la dinámica y su énfasis en las emergencias, las brechas y discontinuidades. Podría decirse que muchos fenómenos puestos en foco por la teoría de las estructuras disipativas han sido tematizados también por los catastrofistas, aunque con sesgos peculiares y aparatos conceptuales distintos. Habiendo disfrutado de una bienvenida inmoderadamente triunfal, la TC se encuentra hoy muy desacreditada, tras casi desaparecer del panorama científico e intelectual en la década de 1980; en los años siguientes experimentó una resurrección efímera, gracias a la fascinación que despertó su nombre entre posmodernos y constructivistas (Lyotard 1986; Ibáñez 1990; Baudrillard 1992).

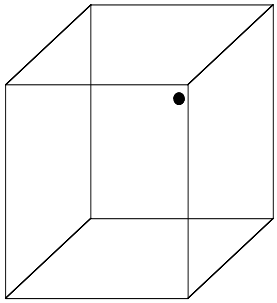
La TC es una rama de las matemáticas que en vez de estudiar configuraciones o fenómenos estructurales como la homeostasis estudia singularidades, es decir, irregularidades, rupturas, quiebras: los fenomenólogos y hermeneutas ya tenían en sus repertorios conceptos que evocaban ideas parecidas. Lo que ocupa a la TC son las propiedades de las singularidades como tales, sin referencia alguna a los mecanismos concretos subyacentes. Eso la hace apropiada para el análisis de sistemas cuyos mecanismos no se conocen o para situaciones en las que las únicas observaciones disponibles se refieren a las discontinuidades. En principio cualquier forma de cambio es susceptible de describirse conforme a esta teoría: cambios en el curso normal de los acontecimientos, en la forma de un objeto, en el comportamiento de un sistema, incluso cambios de las ideas. En todo caso, y aunque podría considerarse que ambas son teorías sistémicas, las herramientas matemáticas de la TC en nada se asemejan a las ecuaciones diferenciales de la TGS. Lo dice el fundador de aquélla, René Thom:

> El cálculo diferencial fue creado especialmente para describir la evolución de los estados de un sistema. … [S]iempre quedaba una cierta *unidad del sistema*. … [C]uando se describe la evolución de un sistema mecánico con una ley diferencial, se puede decir que existe un espacio de las fases que describe la totalidad de los estados posibles del sistema, un espacio del cual no se sale. En la teoría de las catástrofes la situación es un poco más paradójica: se esfuerza por describir las *discontinuidades* que pudieran presentarse en la evolución del sistema. Intuitivamente, se admite que la evolución global de un sistema se presenta como una sucesión de evoluciones continuas, separadas por saltos bruscos de naturaleza cualitativamente diferente (Thom 1985: 66).

La TC se inscribe en esa sección de las matemáticas cualitativas que se conoce como topología. Su base formal es la teoría de las singularidades de Hassler Whitney, difundida en la década de 1950, a partir de la cual combina las modalidades más abstractas de las matemáticas (geometría y topología diferencial y algebraica, teoría de grupos, álgebra conmutativa, teoría de espacios complejos) con otras de carácter más aplicado (estabilidad de los movimientos en sistemas dinámicos, bifurcaciones en estados de equilibrio, óptica ondulatoria). Se trata entonces de una formulación no cuantitativa, aunque sí estrictamente formal. Muchas veces se ha observado, por ejemplo, que los patrones de ramificación de un árbol, de las cuencas fluviales o de las células nerviosas tienen un aire de familia. Fenómenos de cambio muy diversos (la manera en que se descascara una pared, los contornos de una nube, la explosión de las burbujas en la espuma de la cerveza, la proyección de formas tridi-

mensionales móviles en la retina) responden, si se los mira en cierta forma, a una pauta semejante. La ubicación, la magnitud y el tiempo de los diferentes sucesos es impredecible, pero los patrones de desarrollo y la topología de sus bifurcaciones son recurrentes.

Consideremos un fenómeno perceptivo muy común: el cubo de Necker. Se trata de una figura tridimensional (representada en un plano) que posee un círculo que puede interpretarse de dos maneras: como si estuviera en un ángulo de la una de las caras del cubo, o como si estuviera cerca del centro de la cara opuesta. Las dos caras en que estaría situado el círculo, a su vez, se pueden interpretar según una perspectiva "en descenso" (la cara más baja y a la izquierda es la más cercana) o según un plano "en ascenso" (la cara más alta y a la derecha está más cerca del observador).



Las dos posiciones alternativas del círculo o punto y las dos formas de interpretar la perspectiva suman cuatro visiones diferentes que el observador puede modular a voluntad. Si se lo propone, puede imponer a una figura objetivamente invariante la interpretación que le plazca. Ahora bien, el caso llamativo (y aquí es donde entra la idea de catástrofe) es que todas las interpretaciones posibles resultan interexcluyentes y discontinuas. Cambiar una interpretación por otra es un proceso catastrófico, que se da de golpe, sin transición alguna. Uno no se puede detener en el medio de un cambio perceptual de este tipo. No es posible combinar dos interpretaciones contrapuestas; no se puede captar el "movimiento" del círculo de una coordenada interpretativa a otra. Sean cuales fueren los mecanismos subyacentes, hay una cantidad finita y discreta de interpretaciones terminales que en este caso está dada por una sola variable de control: la perspectiva. No hay manera de predecir la configuración perceptual que aparecerá primero, pero las formas de interpretar el diseño son pocas y predecibles, y permanecen estables una vez que se adoptan. Esta estabilidad (precaria, por cierto, pero estable al fin) es lo que Thom denomina estabilidad estructural. El proceso de transición de una interpretación a otra es un claro ejemplo de morfogénesis. El texto fundacional de Thom, editado en 1972, se titula, en efecto, *Estabilidad estructural y morfogénesis* (Thom 1997), y se plantea como una ambiciosa teoría general de los modelos.

La morfogénesis ocurre entonces como catástrofe. Desde la perspectiva de esta teoría de catástrofes (el nombre le fue puesto por E. C. Zeeman), Thom desarrolló profusas especulaciones filosóficas, mientras que Zeeman prefirió elaboraciones de tipo aplicativo, primero en biología y luego en ciencias sociales (Aubin 1998). Pronto se encontraron procesos parecidos (aunque más complejos) en una amplia variedad de fenómenos perceptivos, evolutivos, psicológicos, físicos, económicos y sociales. Se generalizó entonces llamar "catástrofe" a cualquier transición discontinua que sobreviene cuando un sistema puede tener más de un estado estable, tiene más de un grado de libertad o puede seguir más de un curso de evolución. La catástrofe es el salto de un estado a otro, que puede no ser verdaderamente instantáneo pero que ocurre en una escala de tiempo mucho más breve que la de la estabilidad.

El número de configuraciones cualitativamente diferentes de las discontinuidades que pueden producirse depende no del número de variables de estado (que puede ser muy grande), sino del número de variables de control (que suele ser muy pequeño). Los cálculos resultan de tal manera que si el número de variables de control no es mayor de cuatro (y siempre puede encontrarse la forma de llegar a tal reducción), entonces hay solamente siete tipos de

catástrofes fundamentales. En otras palabras, mientras que hay un número infinito de maneras en que un sistema puede cambiar continuamente (permaneciendo en o cerca del equilibrio) hay sólo siete formas estructuralmente estables para el cambio discontinuo. Las catástrofes posibles son en realidad muchas más; pero las llamadas siete catástrofes elementales son las más básicas, las más manejables intelectualmente, ya que ilustran las siete formas más simples en que puede ocurrir una transición. Las demás formas son concebibles, pero inestables; es improbable que se manifiesten más de una vez, y carecen de los elementos recurrentes que se requieren para quedar establecidas en el lenguaje o en la teoría.

Es posible ilustrar las catástrofes mediante grafos que representan los estados estables como conjuntos de puntos (líneas o superficies) en un espacio de conducta. Los grafos nos permiten incorporar una gran cantidad de información sobre causas y efectos en un diagrama descriptivo. A menudo, ilustrar un proceso mediante un grafo debido a que su conducta corresponde a algunos de los factores tenidos en cuenta, permite estudiar el modelo para analizar otros aspectos más escondidos y otorgar una dimensión imaginaria a un razonamiento verbal. En un espacio de conducta, cada estado posible de equilibrio se representa con un punto; los puntos forman una línea suave o una superficie; un cambio discontinuo aparece como un movimiento que abandona la línea o superficie.

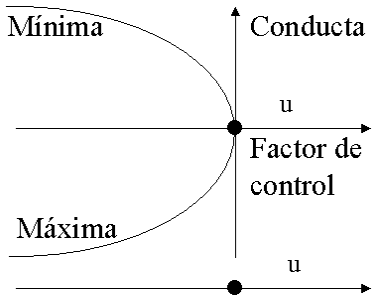


Fig. 2.3 - Catástrofe de pliegue

La catástrofe más simple, el *pliegue*, posee un solo eje de control y un solo eje de conducta, y es entonces la única que se puede representar en dos dimensiones. La catástrofe más compleja (el ombligo parabólico) tiene cuatro ejes de control y dos ejes de conducta, por lo que sólo se la podría representar en seis dimensiones. La tabla adjunta sumariza las catástrofes elementales. Los nombres de las cuatro primeras catástrofes de la tercera columna fueron sugeridos por los rasgos visuales de los grafos que los representan; los restantes, que son difíciles o imposibles de visualizar, son más bien de inspiración matemática. El nombre de "cola de milano" o "cola de golondrina", por ejemplo, fue sugerido por el matemático francés ciego Bernard Morin (sin relación con Edgar, hasta donde conozco). La variedad que más nos interesa en ciencias sociales es la segunda, la cúspide; el pliegue es excesivamente simple y casi se diría que una descripción verbal puede llegar a ser más clara que una representación matemática o un diagrama; las restantes son, hoy por hoy, inaccesibles en el actual estado de conceptualización. El sentido de los dibujos, tan frecuentes en los desarrollos de esta teoría, es el de "explicar" el fenómeno, según el significado que esa palabra tiene para los catastrofistas: explicación es aquí cualquier procedimiento que reduzca la arbitrariedad de la descripción (Thom 1985: 97).

Cada tipo de catástrofe se asocia a una situación de tiempo y un concepto de espacio. Con una sola variable de control, el pliegue denota entonces una frontera y un comienzo (o un

final); la cúspide, una falla similar a las fracturas geológicas y la acción de separar, unir o cambiar; la cola de milano, un desdoblamiento o surco y una separación o rasgado; la mariposa, una bolsa que se llena o se vacía; la singularidad umbílica elíptica, un objeto puntiagudo como una púa o un cabello y la acción de horadar o llenar un agujero; la umbílica hiperbólica, un arco en tensión y un derrumbe; la umbílica parabólica, una boca y una expulsión o un taladrado (Saunders 1983: 148-150).

Parámetros de control	Variables de estado	Catástrofe	Función
1	1	Pliegue	$x^3 + ux$
2	1	Cúspide	$x^4 + ux^2 + vx$
3	1	Cola de Milano	$x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$
4	1	Mariposa	$x^6 + tx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$
3	2	Ombligo hiperbólico	$x^3 + xy^2 + w(x^2 + y^2) + wx + vy$
3	2	Ombligo elíptico	$x^3 + y^3 + wxy + ux + vy$
4	2	Ombligo parabólico	$x^4 + x^2y + wx^2 + ty^2 + ux + vy$

Tabla 2.7 – Las siete catástrofes elementales

La catástrofe de pliegue representa la conducta de los sistemas que dependen de la condición de una sola variable o factor de control. Esta modalidad de catástrofe es bastante poco informativa, pues en ella pueden suceder muy pocas cosas, todas obvias. El sistema se puede mover a un nivel de mínima tensión (si se le permite), puede quedar balanceado en un punto de inflexión, o se torna inestable. Un ejemplo podría ser el de una banda elástica, en el que el factor de control es la fuerza que se aplica para estirarla y el espacio de conducta es su tensión. Hasta un cierto nivel, la banda se estira, minimizando la tensión haciéndose tan corta como puede; más allá del nivel crítico, la banda se rompe: ya no hay tensión que medir. Las partes rotas de la banda no tienen en rigor que acomodarse a ninguna curva, ya que cualquier posición es tan estable como cualquier otra. Lo mismo sucede con un globo que se infla y estalla, otro ejemplo habitual del modelo.

La siguiente catástrofe es la *cúspide* o singularidad de Riemann-Hugoniot, la más trabajada en toda la teoría y la de más frecuentes aplicaciones en ciencias humanas. La representación tridimensional de una catástrofe de cúspide se ha convertido tal vez en el emblema, en el símbolo público o publicitario de toda la teoría. Todo punto en el grafo que la describe una catástrofe de cúspide representa un estado de equilibrio: los puntos cercanos al borde inferior son máximas inestables; los puntos cercanos a la línea de pliegue son puntos de inflexión semi-inestables. Todos los demás puntos son mínimas estables. El ejemplo clásico de la catástrofe de cúspide es el modelo de Zeeman de la conducta de un perro. Siguiendo a Konrad Lorenz, los factores dominantes de la conducta canina ante la amenaza de otro perro más grande serían la furia y el miedo. El perro se desplaza por la superficie conforme esos dos impulsos lo mueven en un sentido o el otro. Cuando la situación llega a un límite, el perro cae por la pendiente y adopta eventualmente otra conducta: la fuga.

Para ciertas combinaciones de valores de los factores de control, hay sólo dos estados posibles, uno montado arriba del pliegue y otro en la superficie inferior. Bajo estas condiciones, se dice que la conducta del sistema es "bimodal", lo cual significa que las mismas condiciones permiten uno u otro de los estados estables. Una tercera posibilidad quedaría en el interior del pliegue, pero esta es una región conceptualmente inaccesible, en la que cualquier disturbio, lo más mínimo que suceda, empuja hacia uno de los puntos estables, arriba o aba-

jo. Es posible que se dé incluso un proceso catastrófico especial, que se expresa con un atravesamiento hacia arriba a través del pliegue, al que los especialistas llaman "histéresis", un fenómeno que se encuentra en muchos procesos dinámicos, desde los circuitos eléctricos hasta las psicosis maníaco-depresivas. La riqueza representacional de la catástrofe de cúspide es ostensible: se pueden denotar la bimodalidad, la divergencia, dos formas de cambio catastrófico, transiciones suaves o violentas entre los mismos estados iniciales o finales, bifurcaciones, caídas en picada. Se reconocerán también aquí nociones de la teoría de sistemas: multifinalidad, equifinalidad, estado estable, morfogénesis.

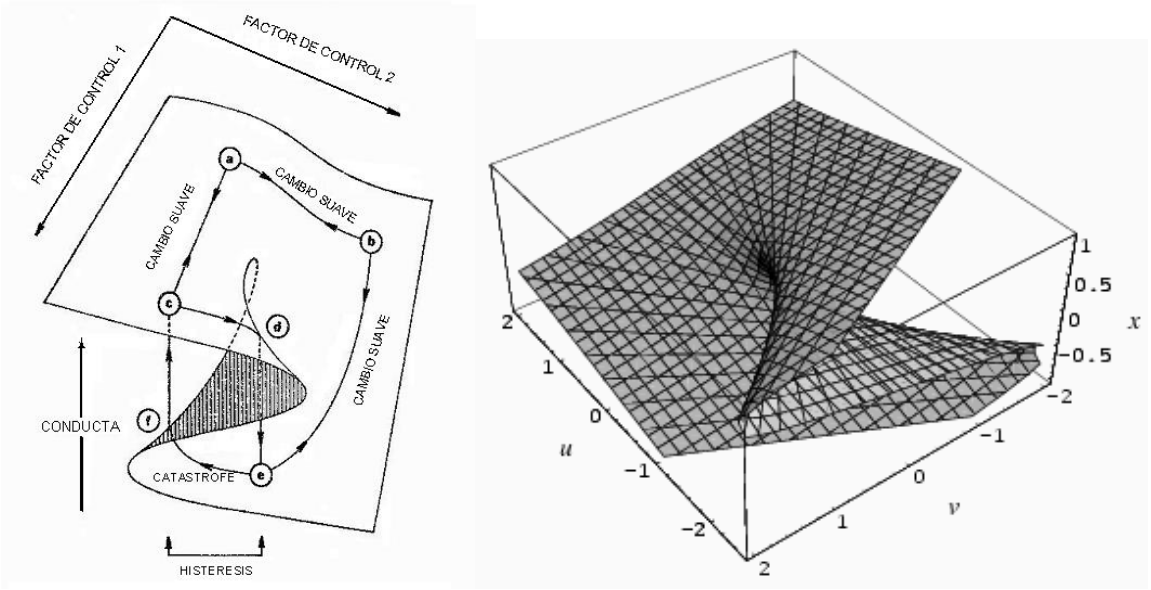


Fig. 2.4 – Catástrofe de cúspide

La TC, apenas constituida, fue saludada por *Newsweek* como una revolución en las matemáticas, comparable a la invención newtoniana del cálculo diferencial e integral, y estimada mucho más importante que el análisis matemático. El articulista, Charles Panati, especialista en asuntos paranormales que impulsó la carrera de Uri Geller, pensaba también que la TC constituía un paso importante hacia la conversión de las ciencias inexactas en exactas (Panati 1976; Gardner 1988: 569). En Inglaterra, el programa *Horizon* de la BBC dedicó una edición a la TC, al tiempo que *New Scientist* presentó en su nota de tapa una leyenda escorzada en grandes letras de piedra agrietadas que decían "CATASTROPHE THEORY", en el estilo de los carteles de cine catástrofe de la época. En Francia llegaron a constituirse una semiótica catastrófica y una morfogénesis del significado de enormes dimensiones, alrededor de las cuales se establecieron congresos multijornadas y publicaciones multivolúmenes, bajo la conducción de Jean Petitot-Cocorda.

Es digno de mencionarse el extraordinario desarrollo alcanzado por la TC en la ex-Unión Soviética. En castellano ha podido conocerse un raro estudio debido a Vladimir Arnol'd, quien por un lado nos brinda un inesperado caudal de referencias bibliográficas, y por el otro cuestiona los aspectos místicos y oscurantistas de ciertas versiones de esa teoría, que ha dado lugar a la proliferación de "artículos que se distinguen por un descenso brusco y catastrófico en el nivel de exigencia de rigor y de novedad" (Arnol'd 1989: 29). Desde la perspectiva contemporánea, la singularidad del texto de Arnol'd consiste en su intuición del isomorfismo entre la TC y los estudios de bifurcaciones, comportamientos aperiódicos y atrac-

tores extraños que, años más tarde, conformarían el núcleo central de las teorías del caos (Arnol'd 1989: 43-50).

Pocos años después del espectacular estallido mediático de la TC, comenzó a manifestarse un movimiento de reacción que pronto se tornó incontenible. En 1976, Raphael Zahler de Yale y Hector Sussman de Rutgers examinaron sus aplicaciones y llegaron a la conclusión de que estaban malamente formuladas, se basaban en hipótesis equívocas, conducían a pocas conclusiones que no fueran triviales y hasta constituían un peligro público (Sussman y Zahler 1978). Uno de los primeros reportes contrarios a la TC fue un artículo de Gina Bari Kolata (1977) publicado en *Science* que revisaba los trabajos de Zahler y Sussman. Kolata afirmaba que muchos matemáticos tenían a esta teoría en bajísima estima; aplicarla a la conducta humana, sostenían, no hacía más que describir una estructura familiar con una nueva terminología, llena de colorido pero fútil. Las descripciones catastrofistas eran demasiado vagas y no cuantitativas, de modo que no conducían a ideas que valieran la pena. No decían nada que no se supiera de antemano. En la correspondencia subsiguiente participó la matemática Marjorie Senechal, quien se quejó de la frivolidad de los científicos que abandonaban su objetividad y se sumaban a las modas del día.

Martin Gardner ha encontrado analogías entre la TC y la teoría de campos del psicólogo social Kurt Lewin, que en su momento de gloria suscitó también conversos y fanáticos, prodigando diagramas, generalizaciones y retóricas parecidas. La teoría de Lewin parecía prometedora, pero pronto resultó evidente que era poco más que una reafirmación estéril de lo obvio. Gardner documenta además el rechazo de la TC por Stephen Smale, figura legendaria de la ciencia del caos, quien afirmaba que dicha teoría "[t]iene más de filosofía que de matemática, y ni siquiera como filosofía puede aplicarse al mundo real"; y añade que Mark Kac, otro destacado matemático, consideraba los trabajos de Zeeman como "el colmo de la irresponsabilidad científica" (Gardner 1988: 574). Otros críticos objetaron el desprecio hacia la literatura existente por parte de los catastrofistas, la tendencia de éstos a hacer afirmaciones aparatosas y el uso de una matemática arcana y sofisticada sin haberse esforzado antes por adquirir sus rudimentos (Aubin y Dahan 2002: 304).

Todos los libros sobre TC de la década de 1980 a esta parte dedican capítulos enteros a examinar la controversia. Alexander Woodcock y Monte Davis (1978: 85) prefirieron sumarse a la posición sensata y equidistante de Robert Rosen: "Si un científico en particular encuentra esos conceptos ofensivos, pues que no los use; no hay razón por la que deba interpretar su existencia como una afrenta personal". Documentando las discusiones entre partidarios de la teoría de las bifurcaciones y la TC, Woodcock y Davis presienten que en el largo plazo, es muy probable que una de ellas termine absorbiendo a la otra. Considerando la época, esto es lo que se llama una predicción perfecta: cuando hacia fines del siglo XX los impersonales estudios de la bifurcación y las turbulencias que se estaban elaborando en los enclaves desérticos de Texas y Nuevo México se convirtieron de lleno en la ciencia del caos, eso fue exactamente lo que sucedió.

2.6.2 – Teoría de catástrofes en ciencias sociales

En los años que siguieron a la presentación en sociedad de la TC surgieron, como hongos después de la lluvia, implementaciones de ella en todas las disciplinas; sus metáforas llegaron a ser moneda corriente en los medios intelectuales y en el periodismo. Se aplicó la TC a las quiebras financieras, las crisis bursátiles, las decisiones sindicales de ir a la huelga, los

vaivenes de la opinión pública, las eclosiones de pánico en las muchedumbres, las revoluciones, la caída del imperio romano, la fonología y el colapso de empresas. Salvador Dalí pintó en 1983 un cuadro inspirado en la TC, "El rapto topológico de Europa: Homenaje a René Thom", un paisaje de pliegues grisáceos, fracturado y yuxtapuesto a una ecuación; la pintura forma parte de una serie inspirada en la teoría de la singularidades, llena de mujeres contorsionadas topológicamente y de retratos faciales que evocan la forma de la cola de un milano; complementa esta colección un breve *Tratado de escritura catastrofeiforme*.

Las catástrofes de cúspide han sido los modelos más favorecidos con todo tipo de usos en ciencias sociales, y en especial en política, en dinámica de grupos y en psiquiatría. En 1980, por ejemplo, el antropólogo David Weaver (1980) publicó en el *Journal of Anthropological Research* un artículo donde aplica modelos de catástrofe para analizar la evolución humana. En ese trabajo se presentan dos proyecciones en cúspide, que se articulan sobre ejes continuos tales como estrategia de alimentación (herbívoro-carnívoro-omnívoro), flexibilidad y complejidad conductual y robustez craneana-tamaño de molares en la primera, y robustez, morfología y aislamiento evolutivo en la segunda.

En 1981, el antropológo canadiense Dennis Bartels (1981), en una breve nota en *Current Anthropology*, ejemplificó los cambios dialécticos (en el sentido marxista) ocurridos en las relaciones de raza y clase en Guyana como un modelo de cúspide, mapeando los cambios cuantitativos, las transformaciones cualitativas y la resolución de las contradicciones en el ya familiar espacio de conducta. La nota de Bartels se inspira en un trabajo de Martin Zwick (que no he consultado) quien había entrevisto una analogía entre el concepto marxista de dialéctica y ese modelo de catástrofe.

Por la misma época se desarrolló en Francia un seminario sobre la identidad, en el que Jean Petitot-Cocorda (1981) esbozó una posible utilización de la TC en relación con lo que llamó "topología de las diferencias". Su ponencia está escrita en un pomposo lenguaje deleuziano, crispadamente metafórico, lo que agrega al asunto formidables obstáculos de inteligibilidad. No obstante, es significativo que una teoría formal haya podido discutirse incluso en un ámbito discursivo tan cargado de retórica. La presentación como tal carece de errores, pero también de persuasividad. Petitot siguió siendo fiel a la TC durante años, sintiendo más afinidad por ella que por las estructuras disipativas, a despecho del éxito arrasador de éstas en toda Francia (Petitot 1996).

Una de las aplicaciones más polémicas fue diseñada por el matemático inglés Christopher Zeeman en colaboración con psicólogos carcelarios, teniendo en cuenta datos empíricos tales como las peticiones de los prisioneros para ver al alcaide, los pedidos de transferencia de celdas o unidades, etc. El modelo resultante fue más bien descriptivo, aunque efectuaba una "predicción": que se evitarían catástrofes enojosas recurriendo más a la negociación y menos a la fuerza. La discusión que se desencadenó fue de alto voltaje; uno de los críticos afirmó que la teoría de catástrofes se había utilizado

> …no para la liberación sino para el control social. Otra herramienta de manejo se ha agregado a la batería ya existente de técnicas científicamente basadas para mantener subyugados a los prisioneros: la modificación de la conducta, la terapia de aversión, [...] la psicocirugía, los gases contra tumultos y las armas de impacto (Rosenhead 1976).

Se llegó a acusar a Zeeman de colocar cámaras ocultas para obtener sus datos, lo que luego tuvo que desmentirse en el Parlamento. Sea como fuere, no se objetó la eficacia descriptiva de la herramienta sino su uso torcido, aunque en la crítica misma hubo una cierta mala vo-

luntad que hizo que no se tuviera en cuenta que cualquier marco teórico puede utilizarse con cualquier objetivo, y que no hay nada en la teoría de referencia que la convierta intrínsecamente en un instrumento atroz. René Thom (1985: 88), de hecho, era escéptico respecto de la posibilidad de extrapolar la TC a las ciencias sociales. Aunque él mismo intenta un breve juego aplicativo en su obra magna (1997: 331-334), su postura al respecto es la que sigue:

> Al principio, con notable ingenuidad, muchos teóricos de las ciencias humanas pensaban poder introducir en ellas los métodos precisos y cuantitativos de las ciencias exactas. Está claro que hay que abandonar esta esperanza, y, por el contrario, podría suceder que se infiltraran en las ciencias exactas –en un futuro no muy lejano– los métodos de sutil análisis, cualitativos y un tanto difusos, de las ciencias humanas. No obstante, las ciencias humanas adolecen de graves lagunas: muchas de ellas son incapaces de precisar su objeto. ¿Qué es, por ejemplo, un hecho histórico? La teoría estructural … no cuenta con ningún fundamento epistemológico. El sabio elige tal o cual estructura con arreglo a sus necesidades, y no puede justificar esta elección si no es por concordancia a posteriori del esquema abstracto con la morfología empírica (Thom, *Encyclopaedia Universalis*, vol. 17, p. 8).

Una vez más, encontramos que los antropólogos que escogieron las metáforas y modelos de catástrofes son relativamente pocos y que ninguno de ellos es lo que se dice una figura de primer orden, a excepción del arqueólogo Colin Renfrew (Renfrew y Cooke 1979; Renfrew y Bahn 1996). El estudio clásico que aplicó la TC a la antropología sociocultural y la arqueología fue el de Renfrew (1978), quien examinó a la luz de esa teoría el colapso de la civilización Maya clásica y los cambios de los patrones agrícolas de asentamiento de nucleados a dispersos. El modelo específico que se usó fue la catástrofe de cúspide, naturalmente, que es el que mejor cuadra con situaciones de bifurcación. Renfrew señala, correctamente, que a pesar de su nombre la teoría no es particularmente relevante para explicar los cambios en términos de causas externas cataclísmicas, sino que más bien se refiere a cambios drásticos que surgen de modificaciones sutiles en las variables de control, conjunciones de factores que cambian sin grandes discontinuidades. Sin saberlo, Renfrew está anticipando lo que las ulteriores ciencias del caos caracterizarán como la dependencia sensitiva a las condiciones iniciales o los caminos hacia el caos, asuntos que luego estudiaremos en conexión con la ecuación logística. Las conclusiones de Renfrew eran sensatas; sus profecías optimistas demostraron no serlo tanto. Escribe Renfrew:

> En particular, concierne a nosotros los arqueólogos y antropólogos especificar cuántas y cuáles variables de control operan para producir las conductas discontinuas observadas. Las pruebas apropiadas radican, entonces, en mostrar que cambios en las variables de control ciertamente inducen cambios en la conducta, y que no se requiere ninguna otra variable de control adicional para inducir la singularidad (en el nivel de análisis apropiado). … Predigo que la aplicación de la teoría de catástrofes conducirá a un despertar del interés en la forma de tales funciones y por tanto a un renacimiento del interés en la aplicación de un análisis económico "formalista" en oposición al "sustantivista" en antropología (Renfrew 1978: 220).

En la década que siguió a la investigación de Renfrew, sin embargo, nadie despertaría de esa manera; la antropología se sumiría más bien en el sueño sustantivista de la hermenéutica, el posmodernismo y la arqueología post-procesual. El caso es que interpretar un grafo topológico exige una familiaridad con las altas matemáticas que no se alcanza de un día para el otro; los resultados, si los hubiere, tampoco amortizan con generosidad el esfuerzo requerido. En consecuencia, la TC parece estar más allá de las capacidades expresivas e instru-

mentales de una antropología concebida sobre bases aún más débiles y provisionales que ella misma. Decir, como se ha dicho, que esa teoría nos ha servido poco es odioso y pueril; nunca hasta hoy se examinó con paciencia su implicancia para un modelado descriptivo en antropología, fuera de unos breves sondeos que apenas arañan la superficie. Si muchos matemáticos de fuste encuentran que la TC es dificultosa (Wolfram 2002: 1004), estimo que los antropólogos no estamos calificados para expedirnos irónicamente sobre su calidad.

Por otro lado es indudable que la TC no constituye un cuerpo teórico que se esté desarrollando actualmente. Escribía Thom en una autobiografía breve de 1997, disponible (sin referencias) en Internet:

> Es un hecho que la teoría de catástrofes está muerta. Pero se puede decir que murió a causa de su propio éxito. Fue derribada por la extensión de modelos analíticos (o algebraicos) a modelos que sólo eran continuos. Porque en cuanto quedó claro que la teoría no permitía predicción cuantitativa, todos los buenos espíritus… decicidieron que no tenía valor alguno.

Ahora que los objetos gráficos han ganado nueva reputación al impulso de la geometría fractal y los atractores extraños, puede que la TC, menospreciada durante un tiempo, recupere un poco de su esplendor inicial. Algunos de los obituarios de René Thom, fallecido en octubre de 2002, admiten que él preparó el camino para las ciencias del caos y la complejidad. Por eso es que hay aquí y allá señales de una leve recuperación; una simple búsqueda conjuntiva de "catastrophe theory" y "chaos" en Internet devuelve varios miles de vínculos. En las nuevas ciencias de la dinámica no lineal y los sistemas complejos las contribuciones de la TC son miradas siempre con respeto, pero nunca como el marco abarcativo que alguna vez pretendió constituir (Strogatz 1994: 72; Wolfram 1994: 4, 34; Aubin 1998: 111).

Aunque los estudiosos de las humanidades no ganen gran cosa yendo a la pesca de pliegues y cúspides, sin duda hay en la TC elementos que ayudan a homogeneizar la terminología del cambio y otorgarle una dimensión figurativa. Vista desde las ciencias complejas actuales, la TC también tiene sus lagunas: al ser topológica, no hay en ella temporalidad en el sentido métrico, o con el requisito de irreversibilidad que se ha tornado corriente después de Prigogine. A pesar de su fracaso, hay algo en las ideas de los catastrofistas que ha pasado a formar parte del fondo de supuestos de los científicos: se sabe ahora que existen regularidades aún en los procesos de crisis y desorganización en los que las reglas del juego se rompen, y que es legítimo pensar que todo acontecimiento de cambio tiene una configuración similar a la de muchos otros. Las teorías de la dinámica no lineal redefinieron eso mismo en términos de bifurcaciones recurrentes (las "rutas hacia el caos", que son también unas pocas[6]), introduciendo la cuantificación que estaba faltando y una dimensión de tiempo; en el camino encontraron además constantes, patrones y clases de universalidad que ratificaron muchas de las intuiciones de ese determinista infatigable que fue René Thom.

---

[6] A saber: duplicación de período (bifurcación de vuelta de campana, turbulencia), cuasi-periodicidad (bifurcación de Hopf), intermetencia y crisis (bifurcación tangente, metamorfosis, ruido 1/*f*), transientes caóticos (órbitas heteroclínicas y homoclínicas, atractor de Lorenz) (Hilborn 2000: 121-145). De hecho, en la década de 1960 Thom trabajó en el IHÉS de París con Stephen Smale, David Ruelle y otros especialistas en dinámica no lineal, iniciando un campo de modelado topológico que anticipó no pocas ideas de la teoría del caos (Aubin 1998).

2.7 – Los paradigmas discursivos de la complejidad

Mientras que las teorías que consigné hasta ahora contemplan la complejidad como característica emergente cuando se tratan determinadas cuestiones de cierta manera, este capítulo se ocupa de discursos que toman la complejidad como un objeto de reflexión en sí mismo: su definición, su naturaleza, su distintividad epistemológica. No me ocuparé de referir en detalle qué es lo que ellos dicen acerca de las teorías de la complejidad de primer orden, porque encuentro mejor abordar éstas sin mediaciones algo más adelante. Sólo deseo señalar que al menos una parte de esos discursos no es autónoma sino mediadora, didáctica, intérprete; traduce los términos de la investigación sustantiva a ideas inteligibles para lectores educados sobre otras bases y orientados hacia otros universos de sentido. La pregunta que cabe hacerse es si domina los elementos de juicio que se requieren para hacerlo bien.

La patria de preferencia de lo que aquí llamo paradigmas discursivos de la complejidad es Francia y sus nombres más resonantes son los de Henri Atlan y Edgar Morin. Ambos han sido reclamados como propios por constructivistas, posmodernos e impulsores de la investigación de segundo orden; pero si bien entre aquellos autores y estos grupos está claro que existe una relación de simbiosis y hasta de simpatía recíproca, Morin se atreve a comenzar su *Ciencia con conciencia* (1984) con un capítulo en que aboga "por la ciencia", lo que en esos tiempos era un gesto de audacia; Atlan tampoco es proclive a renegar de la ciencia, ni acepta la negación del principio de objetividad, ni la disolución de la dualidad entre sujeto y objeto (Atlan 1991: 88, 114, n.67). Él lo ha establecido sin cortapisas y admirablemente:

> Cada vez que, en las ciencias de la naturaleza, se tiene presente la función y la posición del observador (y esto ha empezado, por lo menos explícitamente, con la mecánica cuántica), no se trata de ningún modo de la subjetividad del individuo sino de un ser teórico (el observador físico ideal), que no es más que una forma abreviada de designar el conjunto de operaciones de mediciones y operaciones posibles que se dan en el ejercicio de una disciplina científica, teniendo en cuenta además el cuerpo de conocimientos que caracterizan a esta disciplina en un momento dado. El deslizamiento del papel de este observador físico ideal al de la subjetividad y de la conciencia del individuo constituye una de las principales fuentes de malentendidos y de confusiones ya en las desviaciones espiritualistas de la mecánica cuántica y, también, claro está, en las de las nuevas teorías del orden y de la complejidad (Atlan 1991: 135).

Si bien Atlan posee cierta pericia básica en el modelado de la complejidad a través de autómatas celulares y otros formalismos, el más ambicioso de los proyectos que versan sobre la complejidad en sí es, sin duda, la antropología de la complejidad de Edgar Morin (1974; 1988; 1996). Esta no es en absoluto una antropología como la entiende la generalidad de los antropólogos, sino una meditación sobre la naturaleza de la complejidad y las reformulaciones que debe sufrir el pensamiento para afrontarla, de las cuales el examen reflexivo de sus propios principios y condiciones materiales no es la más trivial. Hay en Morin, sin embargo, una predilección poco reflexiva por el registro de intuiciones brillantes y cambios paradigmáticos llenos de dramatismo, en detrimento del examen de los fundamentos formales y algorítmicos de las ciencias complejas. Lástima grande, dedica más energía a una crítica innecesaria del pensamiento simplificador, "*la barbarie de la science*", que al refinamiento de su propia competencia en materia de las matemáticas y los principios computacionales que constituyen la carne de las estrategias complejas.

Las fuentes de Morin casi nunca son técnicas, por lo que ha sido acusado de ser un divulgador que se basa en un fondo bibliográfico elemental, que no profundiza en las consecuencias de sus tesis o que soslaya estudios esenciales (Morin 1984: 21-22; 2003: 141; Dobuzinskis 2004). La recriminación es motivada: los textos introductorios, los libros escritos para el gran público y los testimonios patriarcales dominan la lista de sus referencias; pocas veces se encuentra que Morin trate contenidos expuestos en *papers* de carácter técnico, de esos que, a fuerza de probar teoremas, proponer algoritmos o publicar código fuente llevan adelante la rutina poco glamorosa del trabajo científico de cimentación. Morin lo sabe y lo admite: "Sé, pues, que ignoro trabajos importantes, y que en ciertos casos la fuente de segunda mano oculta la de primera" (Morin 1999: 529).

También abunda Morin más de lo prudente en consignas sobre la ceguera y unilateralidad de la ciencia regular, y en la convicción imperdonablemente ingenua de que con un temperamento equidistante entre subjetividad y objetividad, intuición y rigor, azar y necesidad, pensamiento global y pensamiento analítico, hemisferio derecho y hemisferio izquierdo, se podrá orientar hacia el camino correcto el estudio de las cosas complejas. Esta equidistancia deviene una especie de moralismo prescriptivo, que en su interés por establecer polaridades encuentra aceptables algunas formulaciones que no lo merecen y ejerce violencias interpretativas sobre muchas otras. Al construir su paradigma complejo, al igual que otros en su misma línea discursiva (Capra, Ibáñez, Vincent), Morin cede a la tentación de armar su esquema sobre un conjunto de contrastes binarios; los he articulado como una tabla (2.8) que podría servir a un buen entendedor como compendio de su credo y su paradigma.

Paradigma de simplicidad	Paradigma de complejidad
Principio de universalidad	Complementación de lo universal y lo singular
Eliminación de la irreversibilidad y acontecimiento	Irreversibilidad del tiempo (Prigogine)
Principio reductor del conocimiento	Necesidad de unir las partes al todo
Principio de causalidad lineal exterior a los objetos	Inevitabilidad de organización y auto-organización
Subsunción a leyes, invariancias, constancias	Causalidad compleja (Maruyama) y endo-causalidad
Determinismo universal	Azar y dialógica: → orden → desorden → interacción → organización → orden …
Aislamiento/disyunción de objeto y entorno	Distinción pero no disyunción
Disyunción absoluta sujeto/objeto	Relación entre el observador y lo observado
Eliminación del sujeto del conocimiento científico	Necesidad de una teoría científica del sujeto
Eliminación de ser y existencia por formalización y cuantificación	Introducción del ser y la existencia
Autonomía inconcebible	Autonomía a partir de la auto-organización
Fiabilidad en la lógica, contradicción como error	Límites de la lógica (Gödel); asociación de nociones concurrentes y antagonistas
Ideas claras y netas, discurso monológico	Dialógica y macro-conceptos; complementación de nociones antagonistas

Tabla 2.8 - Oposiciones de simplicidad y complejidad en Morin (1984: 358-362)

Fuera de ello hay tres principios fundamentales "que pueden ayudarnos a pensar la complejidad":

(a) El principio dialógico, que encarna dos lógicas contrapuestas pero mutuamente necesarias. Por ejemplo, orden y desorden son enemigos, pero en ocasiones colaboran y producen la organización y la complejidad.

(b) El principio recursivo, que rompe con la idea lineal de causa-efecto.

(c) El principio hologramático, mediante el cual no sólo la parte está en el todo, sino el todo está en la parte. Esta idea traciende al reduccionismo que sólo ve las partes, y al holismo que sólo contempla la totalidad (Morin 2003: 105-108).

En su contexto, se percibe que el camino medio de Morin no es genuinamente equidistante. Concede demasiado mérito al pensamiento laxo, como si la imaginación fuera privativa de éste y no se encontrara a raudales, por ejemplo, en las matemáticas. Morin responde con irritación al extremismo determinista de René Thom (Morin 1984: 111-134); pero jamás se encontrará en sus libros un examen crítico de la mala praxis que se origina en ideas de pensadores por los que él siente afinidad, pese a que sus manifestaciones son innumerables. Ningún irracionalismo lo saca de quicio de manera parecida, o lo pone aunque sea un poco sarcástico. Tampoco da la sensación que cuando Morin protesta contra el exceso de ciencia haya probado antes sus posibilidades y verificado sus limitaciones; siempre que hace gala de equidistancia se descubre que es para favorecer a los términos más permisivos. Su empeño en presentar a los intelectuales como más perspicaces que los científicos (de quienes dice que se abocan a "ideas generales, huecas y tontas") luce poco serio cuando el asunto del que se trata es, precisamente, un conjunto de formulaciones científicas de considerable sofisticación y dificultad (Morin 1984: 26). En su prurito por no excederse en su comercio con la ciencia dura, por otra parte, es palpable que Morin no se tomó el trabajo de asimilar muchas de las cuestiones técnicas relevantes al problema.

A propósito de rigor, la falta de ejercicio en la práctica científica por parte de Morin resulta en equivocaciones que estropean el efecto de su elegancia estilística y su despliegue enciclopedista. Él afirma, por ejemplo, que el término "auto" siempre lleva en sí la raíz de la subjetividad (Morin 2003: 63); que la complejidad, cuantitativamente, involucra "una cantidad extrema de interacciones e interferencias entre un número muy grande de unidades" (p. 59); que la teoría de la información concierne "a la improbabilidad de aparición de tal o cual unidad elemental portadora de información, o *binary digit*, *bit*" (pp. 47-48); que para *toda* la antropología cultural la cultura es un sistema cerrado (p. 45); que existieron sociedades cazadoras-recolectoras "durante decenas de millones de años" (p. 103), y que la complejidad siempre está relacionada con el azar (p. 60).

Sin ánimo de batallar esos asertos uno a uno, señalo que "auto" en "automático", en los autómatas celulares, los autómatas finitos o en la criticalidad auto-organizada no involucra subjetividad en absoluto[7], al punto que un buen prototipo de ejemplificación de este concepto es la conducta dinámica de una montaña de arena; que las ideas de la complejidad se inauguran con Poincaré y el problema de los tres cuerpos y prosiguen con una ecuación logística de una sola variable, lo cual muestra que no se requiere para su emergencia un número grande de parámetros; que los dígitos binarios son las unidades en que se mide la in-

[7] Más aún, en "Principles of self-organizing systems" el propio Ross Ashby repudia el concepto de auto-organización según el cual una máquina o un organismo viviente puede cambiar su propia organización o, como él decía, su mapeado funcional. Pensar que hay una propensión innata para el cambio *autónomo*, argumenta, es pura metafísica. Para que un sistema parezca *auto*-organizarse, debe incluirse un factor externo a él, α, que actúe como su insumo; el *auto* debe ser ampliado para incluir la variable α. Ashby escribe: "Dado que no se puede decir que un sistema sea auto-organizante, y dado que el uso de la frase 'auto-organizante' tiende a perpetuar una forma fundamentalmente confusa e inconsistente de mirar la cuestión, quizá lo mejor sea dejar morir la frase" (Ashby 1962: 268-269).

formación, y no las entidades que se espera aparezcan en el proceso comunicativo; que los cazadores-recolectores no aparecieron hace decenas de millones de años sino bastante más tarde que eso; y que si la complejidad se restringiera al azar sería una entidad estadística poco interesante, pues, como ha dicho Ron Eglash (s/f), "no hay nada complejo en el ruido blanco". Por otra parte, ni el caos determinista, ni la dinámica no lineal, ni los sistemas complejos adaptativos que constituyen el núcleo de las ciencias complejas contemporáneas tienen un ápice que ver con el azar o la indeterminación.

Morin es uno de esos los autores cuya dependencia extrema del pensamiento ajeno le empujan a contradicciones flagrantes, ya que nunca se preocupa por armonizar las discordancias entre sus fuentes de inspiración o por comprender sus implicaciones. En ninguno de sus textos, por ejemplo, advierte que la teoría de las estructuras disipativas es incompatible con la autopoiesis, por lo que según sopla el viento apoya alternativamente a una o a otra. En otro momento suscribe a una concepción de la vida como una auto-organización física que "dispone de cualidades desconocidas para otras organizaciones físicas, es decir, cualidades informacionales, computacionales, comunicacionales y la cualidad de auto-reproducción" y que además está genéticamente programada (Morin 1984: 223-224); pocas páginas después (p. 256) se consagra a una celebración de las máquinas autopoiéticas, cuya teoría reposa en la impugnación de cada uno de esos principios. Por un lado afirma que hay que "evitar que un término que en principio sirve para nombrar adquiera autonomía, parasite el discurso y se transforme en (seudo)-esencia" (1998:139); por el otro, esencializa continuamente al azar, "una dimensión presente en todas las formas de desorden" sin el cual no puede concebirse el origen de la vida, que interviene en todas las formas de evolución, que es generada por todo ser viviente, que es comportada constitutivamente por toda actividad neuro-cerebral y que "está presente en todas partes" (pp. 134-135).

Morin ha sido responsable de divulgar entre los humanistas la noción equivocada de que la complejidad requiere de componentes de numerosidad, aleatoriedad, desorden, ruido e incertidumbre, un concepto anticuado (muy monodiano, por cierto) que la investigación reciente en ciencias complejas se inclina a rebatir. Los expertos en complejidad, en efecto, rechazan que los sistemas numerosos sean de incumbencia para su paradigma (Weaver 1948: 566; Williams 1997; Hilborn 2000: 4, 73; Cvitanović y otros 2002). Un sistema complejo es mesoscópico; contiene algo más de unas pocas, pero mucho menos que muchísimas partes: "Si hay demasiadas partes, aún si interactúan fuertemente, las propiedades del sistema devienen dominio de la termodinámica convencional: un material uniforme" (Bar-Yam 1997: xi; Kadanoff 1999: 499, 586-587). Murray Gell-Mann (1994) ha demostrado que un sistema con pocas variables pero múltiples vías de interacción puede ser más complejo que un sistema con muchísimas variables e interacciones secuenciales en una sola dirección.

Tampoco las nuevas ciencias se contentan con modelos de azar, pues está claro que éstos impiden tratar muchas de las estructuras significativas de un fenómeno; lo expresa Duncan Watts: "La aleatoriedad es una cualidad poderosa y elegante que a menudo es un sustituto perfectamente adecuado de las cosas complicadas, impredecibles y desordenadas que suceden en la vida real. Pero claramente falla en capturar algunos de los principios más poderosos que también gobiernan las decisiones que toma la gente" (Watts 2004: 58). Por otra parte, los algoritmos genéticos de John Holland y la programación evolutiva de John Koza han demostrado que el papel creador del ruido, la mutación y el accidente es prácticamente nulo en comparación con las capacidades de operadores algorítmicos tales como la recom-

binación (*cross-over*) y la selección (Koza 1992; Holland 1992a: 46). Tampoco se sostiene hoy la idea de Morin de que la búsqueda al azar constituye una heurística eficiente; ella no escala cuando el espacio de búsqueda es muy grande; modelos de agentes "de abajo hacia arriba" basados en el principio de morfogénesis de Turing, el algoritmo *branch and bound*, la simulación de templado, las estrategias de enjambre, la búsqueda tabú o las metaheurísticas darwinianas, incluyendo el algoritmo cultural de Reynolds, lo pueden hacer muchísimo mejor (Morin 1984: 171; Turing 1952; Johnson 2003: 15-20; Ray y Liew 2003: 187-199). Debido a razones demostradas en el famoso teorema conocido como "no hay almuerzo gratis" (*no-free-lunch theorem*) de David Wolpert y William MacReady, sin embargo, el desempeño relativo de cada algoritmo depende de la estructura del espacio y de las funciones de costo o adecuación implicadas en cada escenario (Wolpert y Macready 1995).

En algunos respectos la postura de Morin resulta potencialmente lesiva, habida cuenta de la entropía que siempre sufren las ideas que propone un intelectual respetado cuando son otros los que las aplican o interpretan. En particular, la idea de "agregar" la consideración cualitativa del ser y la existencia al lado de la formalización y la cuantitatividad ha resultado en el rechazo de la lógica y las matemáticas *in toto* por parte de no pocos de sus seguidores; éstos han abrazado una epistemología de grano grueso, sin salvaguardias ni control de calidad, alentados por la trivialización de los asuntos formales en el marco moriniano y por la invitación que ha hecho el maestro a que se otorgue el mismo sentido e igual valor a la recursividad y la circularidad, a la autorreferencia y la tautología, o a la multiplicidad de perspectivas y la inconsistencia (Morin 1984: 272-289; Ibáñez 1990: 15, 46). También pienso que es poco razonable que Morin admita sin ninguna cautela la convivencia de nociones "concurrentes y antagonistas" y que celebre más de lo necesario las riquezas heurísticas del error (Morin 1984: 358-362). Literariamente esto proporciona un gran efecto, sobre todo en francés: *erreur* y *hasard* a final de frase suenan majestuosos, y él abusa del recurso. Prefiero ante esto la postura sensata y meditada de Henri Atlan:

> [T]ampoco es posible aceptarlo todo ni confundirlo todo. Si hemos comprendido que la pureza cristalina de la racionalidad es una apariencia engañosa que se halla inmersa por todas partes en lo irracional y el error, que le sirve incluso de condición de emergencia, el postulado recíproco es falso: el error o el delirio no es portador de un germen de mayor racionalidad (Atlan 1991: 45).

En los hechos, la celebración moriniana del error ha dado lugar a posturas deconstructivas sin fundamentación ni coherencia, que se legitiman aduciendo que ellas no hacen más que ejecutar lo que el maestro ha homologado. Como filósofo, Morin debería saber que no hay formas débiles de relativismo epistemológico; una vez que se abandonan los criterios más básicos de validez y justificación, de la clase que sea, una idea vale lo mismo que cualquier otra, y todo vale. Y como han dicho otros antes que yo, si se impone la premisa de que todo vale, se garantizará que todo siga igual.

La pregunta que antes hice sobre la calidad de la pedagogía de Morin debería considerar estos indicios en su respuesta, ya que es patente que de su vuelo rasante sobre las prácticas y las teorías complejas surge una visión que no soportaría un escrutinio científico de moderada exigencia. Quedará para la posteridad el principio de que el estudio de lo complejo debe ser transdisciplinario, aunque la idea se le ocurrió por primera vez a Jean Piaget (1970); pero su mirada depende demasiado del circuito constituido por las estructuras disipativas, la cibernética de segundo orden, la segunda cibernética y la autopoiesis, y pasa por alto los tó-

picos esenciales de la ciencia de la complejidad de las últimas tres décadas: dinámica no lineal, emergencia, caos determinista, filo del caos, bifurcaciones, caminos hacia el caos, sistemas complejos adaptativos, programación genética, criticalidad, dimensión fractal, ley de potencia, ruido 1/*f*, redes independientes de escala, clases de universalidad, *scaling*, vida y sociedades artificiales. Son esos temas, antes que la iniquidad de la barbarie mecanicista, lo que hubiera merecido ocupar un lugar más focal en su reflexión filosófica.

En una de las pocas críticas interesantes sobre el modelo de complejidad de Morin, Laurent Dobuzinskis (2004) estima, razonablemente, que la escala magistral de su proyecto ocasiona que sus metáforas no estén en condiciones de satisfacer las necesidades de una investigación concreta:

> El conocimiento científico no puede ser confinado dentro de formas de discurso estrictamente metafóricas y cualitativas; hay un movimiento dialéctico entre la complejidad metafórica y el desarrollo de modelos formales … que revelan una más fina textura del mundo. … En algún punto, el filósofo de la ciencia debería hacerse modestamente a un costado. Sin importar lo enciclopédica que sea la visión de Morin, uno nunca irá muy lejos en el aprendizaje sobre complejidad si no ve que la utilidad de su obra es la de un trampolín para saltar hacia una investigación más sofisticada. *No* estoy diciendo que Morin afirme que su estilo metafórico puede lograr más que la investigación científica concreta; pero sí digo que ya se han alcanzado los límites de lo que ese estilo puede realizar (Dobuzinskis 2004: 449).

No creo que el discurso de Morin califique como un marco teórico capaz de articular la metodología de una investigación empírica, ni que su propósito fuera suministrar semejante herramienta. De todas maneras pienso que su aporte satisface la necesidad de disponer de una constelación colateral de ideas, algunas de ellas valiosas. Aunque se encuentra a gran distancia de la práctica científica efectiva, de ilustrar sus dichos con casos, o de haber puesto alguna vez los pies en el terreno, no faltan en su visión destellos de una exquisita lucidez. Su obra me resulta digna de recomendación, por más que yo piense que su dominio de los factores técnicos es de un orden precario, que su trabajo más ambicioso fue estragado por el tiempo, que la emulación de su filosofismo por parte de terceros ha traído más oscuridad que esclarecimiento, que poco hay de complejo en lo que él entiende por complejidad y que su *pensée complexe* no refleja la dirección que han tomado las teorías científicas correspondientes. Detalles aparte, y aún a pesar de su portentoso diluvio de equivocaciones, si alguien se juega *pour la science*, en eso al menos yo estoy de su lado.

En un plano mucho menos refinado que el de Morin se encuentra la "nueva visión del mundo" de Fritjof Capra (2003). El inspirador de la *new ag*e, inmolado críticamente por Victor Stenger (1995) a causa de su interpretación mística de la teoría cuántica, proporciona algo así como la versión verde, *no logo*, de unas ciencias de la complejidad en la cual todas las atribuciones de paternidad importantes están equivocadas. En efecto, Capra habla de modelos evolutivos recurriendo a Maturana (pero no a Kauffman o a Holland), se refiere a atractores sin mencionar a Ruelle o a Lorenz, se ocupa de los orígenes biológicos del lenguaje sin acordarse de Pinker y comenta la dinámica no lineal sin recordar una palabra de lo que pocos años antes escribiera sobre caos determinista. También despacha la problemática de la cultura a través de Raymond Williams y toma en serio las ficciones de Carlos Castaneda sin examinar lo que la antropología piensa al respecto. Escamotea además, como de costumbre, toda referencia a Edgar Morin, Henri Atlan o a las ideas concretas de Eric Jantsch aunque sus modelos compartan unas cuantas premisas (Capra 1994: 96). Aún con tamaña selectividad, Capra no puede evitar las contradicciones, como la adscribir a las teorías de

Prigogine y a la autopoiesis pese a que ambas se niegan mutuamente, o sostener la idea de la importancia de una semántica simbolista junto a la teoría de la cognición de Varela, notorio opositor a las perspectivas representacionales (Capra 2003: 38-39, 106-108, 118-120).

Los libros más recientes de Capra derivan todas sus ideas de otros autores, y lo que él aporta por su cuenta en lo que presume ser un ambicioso marco unificado y sistémico para la comprensión de los fenómenos biológicos y sociales se reduce a un par de diagramas que vinculan entidades tales como "significado", "proceso", "forma" y "materia" mediante conectores que por ahora son sólo flechas (Capra 2003: 107), postergando el desarrollo de los operadores teóricos para el día en que a alguien se le ocurra combinar los conceptos de la dinámica no lineal con esas cuestiones (p. 116). Cuando Capra comienza a hablar de las ONGs, los sucesos anti-globalización de Seattle y la economía del hidrógeno la cosa se pone más interesante, pero no guarda ninguna relación con todo lo demás.

Capra perpetra, en fin, una cantidad de yerros poco admisibles en un autor tan prestigioso, que se precia de ser profundo, rebelde e innovador (Capra 1994: 104): atribuye a Maturana ideas sobre la mente como proceso que Bateson formuló mucho antes (Capra 2003: 61); define confusamente los atractores como "complejos patrones geométricos que representan las propiedades dinámicas del sistema" (p. 35) sin sacar ningún provecho de ese concepto; admite la validez simultánea de la autopoiesis y de la evolución pre-biótica de Oparin sin establecer una coordinación entre ambas (p. 38-40); considera explicada la conciencia en términos de un principio dormitivo que "emerge cuando la cognición alcanza determinado grado de complejidad" (p. 66); y asegura, en un gesto que delata su falta de familiaridad con una disciplina entera, que la ciencia cognitiva se deriva de la Escuela de Santiago (p. 61). Esto último es algo que ni siquiera Francisco Varela se atrevió a sugerir, pues en setiembre de 1956 (la fecha que se asigna al nacimiento del cognitivismo) el estudioso chileno contaba sólo con diez años de edad (Gardner 1987: 44-45; Russell y Norvig 2004: 16).

Visión tradicional	Visión de sistemas
Partes	Todo
Mecánico	Organísmico
Atomístico	Holístico
Reduccionista	Ecológico
Sustancia-Materia-Cantidad	Forma-Patrón-Cualidad
Clásico	Romántico
Galileo-Descartes-Newton	Blake-Goethe-Kant
Analítico-Disección	Contextual-Integración
Homeostasis	Auto-organización
Propiedades individuales	Propiedades emergentes
Jerarquías	Redes
Relojería o relojero	La red de la vida o la hipótesis Gaia
Física clásica	Mecánica cuántica
Componentes elementales	Relaciones o conexiones
Psicología tradicional	Psicología gestáltica

Tabla 2.9 - Antinomias de Capra (1996)

Más provocativo aún que *Las conexiones ocultas* (Capra 2003) es *The web of life* (Capra 1996), donde el autor sintetiza sus lecturas sobre la perspectiva de sistemas, la teoría del caos, la dinámica no lineal, los fractales, los sistemas complejos adaptativos, las estructuras disipativas, la teoría de Gaia y (como columna vertebral y joya de la corona) la autopoiesis. El texto es un manifiesto de un "nuevo paradigma" al que Capra llama ecología profunda

(p. 6), pródigo en fusiones por un lado y en dicotomías por el otro, al lado de las inevitables críticas al programa fuerte de la inteligencia artificial (p. 66), a Galileo, a Descartes y a Newton, que a fuerza de repetirse comienzan a sonar fastidiosas. Se concentra tanto en estos menesteres que no le resta margen para articular su nuevo paradigma, que luce como una yuxtaposición de ideas pensadas por otros. Las fusiones son las acostumbradas en el modelo discursivo: entre el *self* y el otro, la forma y la sustancia, la mente y el cuerpo, el conocimiento y la vida, el hombre y el cosmos. Las dicotomías son también las usuales en la retórica de esta corriente y se asemejan a las de Joan Vincent, a las de Edgar Morin y a las de la investigación social de segundo orden; igual que en aquellos casos, las he situado en una tabla (2.9) a fin de resaltar el carácter uniforme y rutinario de esta vertiente de pensamiento.

Algunos revisores han señalado que los valores dicotómicos que Capra exalta o denigra no se sostienen cuando se los contrasta con los hechos. Cuando Capra nos dice, por ejemplo, que la naturaleza propicia la génesis de redes igualitarias, la afirmación choca contra lo que se conoce de la organización jerárquica de los primates u otras especies de mamíferos; hasta los insectos se organizan jerárquicamente, con sus reinas, obreros y zánganos. El caso es que las redes, que él cree admirables, no son necesariamente buenas en sí mismas; cualquier relación entre entidades constituye una red, incluida la brutal dialéctica entre amos y esclavos. Nada de lo que ha dicho Capra a este respecto ha sido tampoco de utilidad en la nueva ciencia de las redes que se está constituyendo en el siglo XXI (Barabási 2003; Strogatz 2003; Watts 2004). Cada razonamiento suyo podría impugnarse sobre esta clase de inspección, que señalo aquí para que quien desee hacerlo la lleve a cabo por su cuenta y compruebe su extrema precariedad.

El texto de Capra tampoco puede tomarse como referencia introductoria a los nuevos paradigmas del caos y la complejidad, pues en su actitud erizada no puede evadirse de la dialéctica de premios y castigos típica de su escuela; todas las cosas de las cuales trata, desde los acontecimientos hasta las teorías, han sido retorcidas para que encajen en esa matriz, sin que ello se acompañe de críticas sustanciales o de ponderaciones de algún grado de rigurosidad. Un caso viene a cuento: incurriendo en pasmosos anacronismos, Capra atribuye a Varela y Maturana la prioridad intelectual en el trabajo con autómatas celulares, prestando crédito a reportes experimentales con máquinas autopoiéticas que, como ya se ha visto, no resisten examen. A partir de los reportes de Varela y otros (1992) sobre sus experiencias, Capra presenta los hechos de manera tal que al lector le queda la impresión de que la Escuela de Santiago trabajó con modelos celulares antes que lo hicieran (digamos) Moore, Arbib, o Conway, y que la pericia computacional de Varela y Maturana ha sido seminal en el desarrollo de los sistemas complejos adaptativos (Capra 1996: 194-199).

Aunque el propio Varela se ha proclamado pionero "del explosivo campo hoy llamado vida artificial y los autómatas celulares" (Varela 2004: 49), estas alegaciones son inexactas: los autómatas eran bien conocidos quince años antes que los estudiosos de Santiago advirtieran su existencia; todos los trabajos autopoiéticos en computación son posteriores al artículo de divulgación de Martin Gardner (1970) en *Scientific American* que puso de moda a los autómatas celulares; las investigaciones esenciales de la década de 1960 sobre sistemas complejos se hicieron por cuenta y cargo del MIT antes que Varela realizara sus estudios de grado en Chile; en el documento original de la máquina autopoiética no se menciona la idea de autómata celular y su programa en Fortran no implementa el paralelismo requerido por esa arquitectura de software; y ninguno de los *surveys* importantes sobre modelos celulares ha

mencionado jamás contribuciones de Varela, quien no ha sido siquiera un analista destacado de esa tecnología (cf. Sarkar 2000; Ganguly y otros 2001; Wolfram 2002). Tampoco las actuales investigaciones en Vida Artificial (a pesar de su propensión a las metáforas biológicas y maquinales) dedican referencias a las máquinas virtuales autopoiéticas (Langton 1997; Emmeche 1998).

Los errores de hecho y las opiniones caprichosas en *The web of life* son otra vez abundantísimos; he localizado un centenar, de los que mencionaré unos pocos tan evidentes que no demandan mucho comentario. Capra sitúa el lanzamiento de la idea de auto-organización en la década de 1970, acordándose de Ashby (1948) páginas más tarde pero volviendo a insistir más adelante; afirma que el concepto de causación mutua de Magoroh Maruyama causó un impacto mayúsculo en las ciencias sociales "contribuyendo significativamente a propagar la influencia de la cibernética" en esas disciplinas; llama al libelo inepto de Robert Lilienfeld sobre la historia de la TGS un "excelente relato"; atribuye el resurgimiento del concepto de redundancia como medida de la organización a von Foerster; suscribe a la opinión de los Dreyfus respecto de que una computadora "jamás podrá rivalizar con un verdadero experto" en (propongo) ajedrez; concede a Prigogine el logro de "descubrimientos revolucionarios" por sus análisis de la inestabilidad de Bénard o de la reacción de Belusov-Zhabotinskii, que hasta nombre tenían; proporciona la peor descripción de la ecuación logística que existe en la literatura, confundiéndola con la transformación del panadero de Smale; mezcla la topología de las catástrofes con la geometría de los atractores y el cálculo de las bifurcaciones; asegura que la TGS fracasó porque "estaba limitada a ecuaciones lineales", siendo que sus ecuaciones diferenciales características son no-lineales; no logra relacionar las matemáticas complejas del caos y los fractales con la teoría autopoiética que domina su paradigma porque, aunque él no lo advierte, no existe ninguna concordancia entre ellas; se afana en demostrar que la concepción de la mente de Bateson y la de Maturana fueron contemporáneas ignorando todo lo que Bateson escribió en los veinte años precedentes; presenta como imagen de una "simulación por computadora de una red autopoiética" unos gráficos que han sido visiblemente dibujados a mano; y sostiene, mezclando todas las citas y los tipos lógicos, que el orden a partir del caos surge gracias a la irreversibilidad. Descontados los errores y las adulteraciones, no queda en el libro nada que no se pueda encontrar desarrollado con más exactitud y profesionalismo en cualquier otra parte.

Lo que encuentro más problemático en la epistemología de Capra es (*a*) el acicate que brinda para que otros menos informados que él multipliquen y extremen los aspectos anticientíficos de su postura, (*b*) la naturaleza puramente ideológica de su epistemología, y (*c*) su propensión sistemática a las atribuciones equivocadas. Mi hipótesis es que esto último, al menos, es consecuencia de una mentalidad de club; el club no es otro que la comunidad de discípulos de Bateson y Prigogine, congregada en un vector que va desde la cibernética de segundo orden hasta la autopoiesis. Sus miembros abundan en reclamos de prioridad que no son verosímiles, y que aún en caso de ser ciertos no deberían ser tampoco relevantes. En este registro, Ernst von Glasersfeld (1992) jura haber sido cibernético desde antes que se gestara la cibernética, Magoroh Maruyama (1988) reivindica la ideación de una morfogénesis que se conoce desde Alan Turing (1952), y Francisco Varela deja que se piense que es suya la noción de "asambleas neuronales" que fuera propuesta por Donald Hebb (1949), y Heinz

von Foerster[8] (1973, 1997) se empecina en atribuirse la invención de un concepto de auto-organización que fue elaborado por Ross Ashby (1947). Sintomáticamente, la pedagogía de Capra replica éstas y otras fatuidades sin los recaudos que requiere la crítica erudita, y siempre se las ingenia para que sus imputaciones beneficien a la misma facción. Abreva también, más aún que Morin, en una proporción desmesurada de textos introductorios, muchos de ellos por debajo del nivel requerido por la extrema delicadeza de las cuestiones epistemológicas que están en juego. El resultado es una visión dos veces sesgada y diluida de las disciplinas, los problemas y los fenómenos: la complejidad vista a través del filtro de la autopoiesis, la mecánica cuántica masticada por Geoff Chew, la alteridad cultural según Carlos Castaneda, la mística psicodelizada por Alan Watts…

La generalidad de los críticos ha destacado la obsolescencia de las teorías cuánticas que Capra promueve y objetado su obstinación por encontrar similitudes circunstanciales entre la ciencia y la mística sin prestar atención a sus desemejanzas o a sus contextos (Pagels 1982; Barbour 1990). El premio Nobel pakistaní y musulmán practicante Abdus Salam (1981), en cuyo departamento se escribió *El Tao de la Física*, piensa que el texto logra devaluar tanto a la una como a la otra. Henri Atlan (1991: 117-119), quien conoce la mística oriental de primera mano, ha llegado independientemente a una conclusión parecida: las interpretaciones faltas de pudor y las aproximaciones fáciles del sincretismo ciencia moderna/místicas orientales son perjudiciales tanto para el racionalismo occidental como para las tradiciones de Oriente.

Para Maureen O'Hara (1999), los *best sellers* de Capra han convencido a la comunidad *new age* de que la ciencia es una especie de Taoísmo con números; Capra ha logrado ese objetivo –dice– empleando los trucos usuales de la seudociencia: teoriza en un lenguaje pomposo que suena a científico, confunde analogía con homología, viola las reglas convencionales de presentación de evidencia y extrapola de un nivel de realidad a otro en el que operan principios totalmente distintos. N. Srinivasan (1998) ilustra la estructura de los razonamientos de Capra por medio de una analogía: "Pregunta: ¿Qué tienen en común Abraham Lincoln y Albert Einstein?. Respuesta: que ambos tienen barba, excepto Einstein".

En las *Notebooks* del Center for the Study of Complex Systems de la Universidad de Michigan, representativas del pensamiento de John Holland, Robert Axelrod y Cosma Shalizi, se afirma que *El Tao de la Física* es "un ejemplo espantoso de lo malo que puede llegar a ser el pensamiento humano". Shalizi opina que la obra de Capra es un espécimen más de las "nuevas físicas" que han florecido periódicamente desde fines del siglo XIX, tomando par-

---

[8] Aunque von Foerster (fallecido en octubre de 2002) se vanagloriaba de haber sido uno de los cibernéticos de la primera hora y muchos creen que ha sido uno de los "padres fundadores" de la cibernética, recién comenzó a asistir a las conferencias Macy en la sexta edición, el 24 y el 25 de marzo de 1949, tres años después de iniciado el ciclo y un año antes de que Wiener y von Neumann dejaran de asistir. Las conferencias fundamentales, por lejos, fueron las primeras cinco. En toda la serie se habló una sola vez de la problemática del observador; quien lo hizo fue Lawrence Kubie (y no von Foerster) y su argumento fue que el observador psicoanalítico debía permanecer tan apartado y no comprometido como fuera posible. La única presentación que hizo von Foerster ocurrió en 1949 y no versó sobre cibernética sino sobre la memoria. Su primer trabajo relacionado con cibernética es de 1958, y consiste en un estudio introductorio a la homeostasis. Contrariamente a lo que se piensa, Humberto Maturana, Ernst von Glasersfeld y Gordon Pask nunca participaron de las conferencias.

tido a favor de la superstición y celebrando que la humanidad esté dejando atrás el materialismo mecanicista (http://cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/new-physics.html), acontecimiento que se festeja en cada ocasión como si fuera la primera vez que se anuncia.

Devenido un escritor exitoso y una celebridad que desborda auditorios, Capra ha abandonado hace tiempo el ejercicio de la investigación básica y la práctica científica efectiva. Él mismo reconoce que

> […] a la universidad de California nunca la ha parecido apropiado financiar mi investigación parcial, ni reconocer mis libros y otras publicaciones como contribuciones valiosas para el desarrollo y comunicación de ideas científicas. Pero no me importa. Poco después de mi regreso a California, *El Tao de la Física* fue publicado en Estados Unidos por Shambhala y a continuación por Bantham Books [sic], convirtiéndose en un *best-seller* internacional. Los derechos de autor y la remuneración de mis cada vez más frecuentes conferencias han acabado por poner fin a mis dificultades económicas (Capra 1994: 63-64).

Echando mano de un expediente argumentativo muy común en el género autobiográfico autopoiético-constructivista, Capra aduce que sus evaluadores científicos, estrechos de miras e integrados al sistema, han sido incapaces de comprender sus valiosas contribuciones [sic] una y otra vez. Mi diagnóstico, naturalmente, es otro.

Al lado del marco panóptico de Morin y del paisaje de retazos de Capra están surgiendo miradas hacia la complejidad desde las ciencias sociales, sobre todo en México (López Aguilar 2001; Juez 2002; Pérez Taylor 2002; Mier 2002). Las de Raymundo Mier y Fernando Juez, en particular, depositan confianza en las ideas de Edgar Morin, lo que alarga más de lo prudente, estimo, la cadena de intermediación entre las necesidades disciplinarias concretas de la antropología y el ámbito de las técnicas sin las cuales ninguna implementación resultaría ejecutable. Por fortuna, las inquietudes de estos estudiosos no se limitan a la reproducción glosada de las formulaciones discursivas, a las que recurren, *a faute de mieux*, en actitud exploratoria.

Fernando Juez, verbigracia, posee una comprensión profunda de los alcances del modelado, aunada con una imaginación activa que le facilita ponerlo en práctica en investigaciones temáticamente novedosas. Rafael Pérez-Taylor, por su parte, está elaborando cursos de posgrado en antropología de la complejidad que han sido los primeros en su género en América Latina, para decir lo menos. He tenido ocasión de participar en ellos compartiendo la cátedra, lo cual es, dada mi postura, testimonio indudable de su espíritu abierto. El camino que él ha escogido es particularmente experimental y difícil, por cuanto pone en juego (y según espero pondrá también en crisis) la viabilidad del paradigma discursivo para sustentar indagaciones empíricas.

Con Fernando López Aguilar, con cuya postura en general me encuentro en simpatía, debo discrepar en un solo punto, que es el del papel que concede a ideas de divulgadores más interesados en formular una anticiencia que en aprovechar las consecuencias creadoras de las teorías de la complejidad y el caos. De ninguna manera, por ejemplo, el "paradigma emergente" propone un camino del algoritmo al sujeto, como hubiera querido Jesús Ibáñez, sino que su trayectoria ha sido rotundamente la contraria (Reynolds 1990a; Pagels 1991; Richards 1991; Epstein y Axtell 1996: 16-17; Wolfram 2002); tampoco es cierto que las ciencias de la complejidad y el caos alientan principios de indeterminismo, phronesis/buen sentido/intuición, comprensión y hermenéutica, como se afirma en una tabla agonística que parece calcada de las antinomias de la investigación social de segundo orden (López Agui-

lar 2001: 294). Poco hay en esas ciencias que sustente esta exégesis; triste sería que ellas se agoten en una axiología que reproduce, en todo caso, valores ancestrales de una postura interpretativa, nihilista o posmoderna cuya esterilidad teórica y práctica a lo largo de tres décadas ha sido manifiesta y cuyo crédito hoy se percibe exhausto.

Más allá de las discrepancias puntuales que yo pueda tener con ellos, está claro que ninguno de estos últimos esbozos de una ciencia social compleja es ni pretende ser una exploración en profundidad de las posibilidades metodológicas que se abren con el paradigma naciente. Están bregando por imponer la idea de la complejidad en una tradición profesional demasiado inclinada hacia las soluciones simples, y lo están haciendo en un terreno que no sólo es conceptual sino también empírico. Califican más bien como reflexiones y búsquedas que aportan ideas de provecho y que preparan el terreno para que textos mejores que el que se está leyendo sean alguna vez posibles.

3. Los algoritmos de la complejidad

A diferencia de lo que fuera el caso de las grandes formulaciones epistemológicas en torno a las teorías de sistemas, los ejemplares a considerar en este capítulo se refieren a formalismos que, si bien responden también a grandes principios epistémicos, tienden a materializarse en modelos de simulación antes que en lenguaje natural. Dado que estos modelos definen, abordan y en muchos casos resuelven cuestiones relevantes para las diversas teorías de la complejidad, no me ocuparé aquí en fundamentar y defender la metodología de la simulación, sino que la daré por justificada y establecida como una herramienta legítima, que es en todo caso tan culpable de simplificar o distorsionar lo real como cualquier otra forma científica o interpretativa. La bibliografía que la justifica es masiva, de modo que el lector puede remitirse directamente a ella (Ziegler 1976; Widman, Loparo y Nielsen 1989). Por otra parte, John Holland ha demostrado convincentemente que no existe una diferencia taxativa entre diseñar un modelo y describir una realidad a través de las reglas de un juego; y los juegos son, junto con los textos y los dramas, las metáforas predilectas de los estudiosos culturales más inclinados a las humanidades y la interpretación (Geertz 1996; Holland 1998: 16-52). Modelar tampoco excluye el libre vuelo del discurso, ni absorbe la totalidad de ancho de banda de la actividad intelectual del estudioso; mi sensación es que se ha logrado más con modelos en diez años que con palabras en treinta, pero no vale la pena plantear una dicotomía excluyente ni abrir un nuevo frente de conflicto, pues ambas estrategias bien pueden convivir en armonía o en integración sinergética y ninguna desaparecerá sólo porque la otra la impugne. Lo que aquí importa, en último análisis, es la eficacia que se ha alcanzado con recursos tecnológicos y métodos formales para formular preguntas y proporcionar respuestas en escenarios de complejidad. Y también importa, por supuesto, la demostración algorítmica, tangible como pocas, de que casi todas las cosas son bastante más complejas de lo que se pensaba.

3. 1 – Sistemas complejos adaptativos

En ciencias de la computación, los llamados sistemas complejos adaptativos no son complejos desde el inicio, sino que consisten típicamente de un número no necesariamente grande de partes muy simples. La conducta de cada una de las partes se puede comprender con relativa facilidad, pero el comportamiento del sistema como totalidad desafía toda explicación. El tiempo irreversible y los efectos agregados de las interacciones, que ocurren en paralelo, llevan a que el sistema siga trayectorias que desconciertan a la intuición. Cambiando el tipo y la forma de las interacciones que existen entre las partes o alterando un poco las condiciones iniciales, la forma de conducta global puede variar enormemente. Fleissner y Hofkirchner describen la auto-organización y la emergencia de estos modelos decentralizados y de este "determinismo menos que estricto" como sigue:

> La entrada y la salida no se encuentran relacionadas de manera que se pueda graficar como un mapeado biyectivo. Diferentes entradas pueden conducir a la misma salida, y la misma entrada puede llevar a salidas diferentes. De este modo, causa y efecto no están acoplados de manera no ambigua. Debido a que no son aplicables los atajos matemáticos, los efectos emergentes no se pueden predecir en detalle. Ninguna transformación mecanicista convierte la causa en un efecto. El sistema mismo posee una actividad que selecciona una entre muchas posibles formas de reaccionar (Fleissner y Hofkirchner 1997).

En este paradigma se materializan, finalmente, las viejas ideas de la emergencia, la multifinalidad, la equifinalidad y la irreductibilidad analítica que se postularan en los días de la cibernética y la teoría general de sistemas.

Existe una rica jerarquía de sistemas complejos, que va desde los autómatas celulares, las redes booleanas y las redes neuronales adaptativas hasta el algoritmo genético. Cada una de estas especies contiene además diversas variedades internas. Las examinaremos una por una para comprender mejor sus arquitecturas conceptuales y sus capacidades de modelado de cara a las ciencias sociales, así como para investigar sus consecuencias epistemológicas. Es necesario hacerlo con prolijidad y con un cierto espíritu de higiene, pues los sistemas complejos, encarnados en colectivos de autómatas unitarios redefinidos como agentes casi antropomorfos, han sido singularizados por las tendencias más proclives al constructivismo que los exhiben como si les pertenecieran o como si desde ellas se hubiera hecho una contribución esencial a su desarrollo (Varela 1990). Los formalismos de los sistemas complejos, empero, no son tributarios de esas escuelas, se han desarrollado con entera independencia de sus prédicas y las preceden ampliamente en el tiempo.

3.1.1 – Autómatas celulares y vida artificial

La forma canónica más simple de un sistema complejo es la que se conoce como autómata celular (AC). El formalismo para estos autómatas fue creado por John von Neumann en la década de 1940 (a instancias de Stanislav Ulam) como marco para el estudio del proceso de reproducción. La pregunta que se le planteó fue si una máquina era capaz de producir otras máquinas tan complejas como ella misma; y la respuesta, revolucionaria, fue afirmativa. El interés de von Neumann (1966), batesonianamente, era la esencia y la forma de la reproducción, antes que cualquier implementación particular del proceso. Por ello dejó al margen los detalles "realistas" de la reproducción animal y se concentró en el *framework* más simple imaginable que permite reproducir información. A pesar de ello, la realización de von Neumann del primer AC resultaba muy compleja, demandando 150 páginas sólo para su descripción. Tenía doscientos mil "espacios celulares", cada uno de las cuales podía adoptar 29 estados posibles. Es paradójico que el modelo estándar de computación con procesamiento centralizado y serial, y memoria globalmente accesible, se llame hoy "máquina de von Neumann", mientras que los autómatas no centralizados se designen como "máquinas no-von Neumann" (Mitchell 1998). También es de interés señalar que el diseño de von Neumann de los autómatas auto-replicantes fue anterior al descubrimiento del mecanismo mediante el cual se auto-reproduce el ADN. Esto es tanto más notable si se tiene en cuenta que el autómata en cuestión contiene no sólo un programa de autocopia, sino la maquinaria lógica que el programa necesita para su propia interpretación: es un dispositivo *auto*-reproductor genuino, pensado en una época en la cual se presumía que la metáfora orientadora debía tener que ver con la vida, pero el modelo genético natural todavía era desconocido.

Los ACs han recibido distintos nombres en la literatura, entre ellos los de modelos de tablero de damas, autómatas de teselación, estructuras homogéneas, estructuras celulares, estructuras de teselación y *arrays* iterativos (Wolfram 1994: 6). Es conveniente que proporcione ahora dos definiciones simples de AC. (1) Los ACs son sistemas decentralizados, espacialmente extendidos, consistentes en un número más o menos grande de componentes simples idénticos con conectividad local. (2) Los ACs son colecciones de celdas discretas y deterministas, en hilera, en grilla o en tres dimensiones, que actualizan sus estados a lo largo del

tiempo en base a los estados que tenían las celdas vecinas en el momento anterior. En otras palabras, el estado siguiente de una celda es una función del estado actual de ella y de sus celdas vecinas. Cada celda se comporta como un autómata de estado finito.

Formalmente, un AC consiste de dos componentes. El primero es un espacio celular: una grilla de *N* máquinas de estado finito (celdas), cada una con un patrón idéntico de conexiones locales con otras celdas, junto con condiciones de límite si es que la grilla es finita. El segundo componente es una regla de transición que actualiza los estados de cada celda. El estado de cada celda junto con el de las celdas que están conectadas a ella se denomina su vecindad. Típicamente, en los ACs unidimensionales se considera que las condiciones de límite son periódicas para evitar efectos de borde: la celda del extremo izquierdo es entonces vecina de la del extremo derecho y viceversa, como si la hilera constituyese un anillo. Lo opuesto de las condiciones periódicas son los denominados límites absorbentes. Siendo las líneas simbolizadas como *i* y las columnas como *j*, la notación de las vecindades se expresa de esta manera:

(I-1, *j*-1*)*	*(i*-1, *j)*	*(i*-1, *j*+1*)*
(I, j-1*)*	*(I, j)*	*(I, j*+1*)*
(I+1, *j*-1*)*	*(I, j*+1*)*	*(I*+1, *j*+1*)*

Existen unas cuantas definiciones de vecindad de una celda. En una matriz bidimensional, la llamada vecindad de Von Neumann involucra sólo a las celdas vertical y horizontalmente vecinas, y no a las diagonales. La vecindad de Moore incluye a todas las celdas de alrededor, ya sea las inmediatamente conexas o las que ocupan zonas de vecindad de tamaño arbitrario, y no sólo cuadrangulares o cúbicas sino de la forma que se quiera. La figura 3.1 muestra cuatro vecindades de von Neumann (a la izquierda) y cuatro vecindades de Moore, con rangos entre cero y tres.

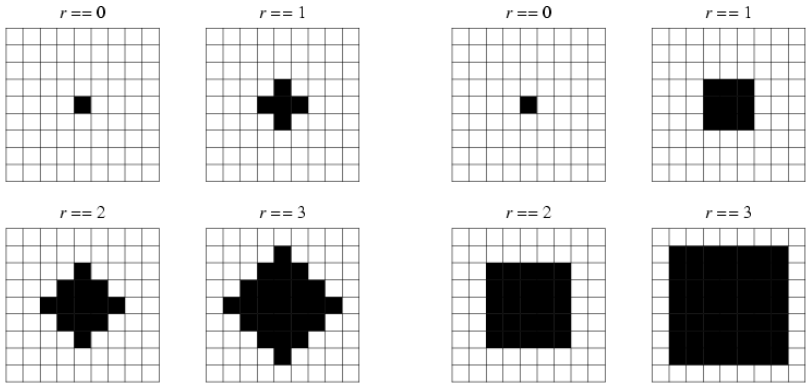


Fig. 3.1 – Vecindades de von Neumann y Moore

Otro modelo de vecindad importante es el de Margolus, en el que se consideran grupos de 2x2 en un patrón hexagonal. Este modelo se utiliza preferentemente en simulación de gases.

Se ha probado que los patrones que se extienden en el tiempo y el espacio pueden almacenar y trasmitir información, y que las interacciones complejas resultantes son capaces de modificarla. Estas tres habilidades (almacenar, reproducir, transformar) son los componentes necesarios y suficientes de cualquier proceso de computación. En virtud de esas capacidades, los ACs han sido utilizados como modelos abstractos para estudiar conductas emergentes cooperativas o colectivas en sistemas complejos, y como modelos de fenómenos fí-

sicos y biológicos, tales como dinámica de fluidos, formación de galaxias, terremotos y constitución de patrones genéticos. Se los considera también objetos matemáticos con los cuales se pueden poner a prueba enunciados formales, puros o empíricos, como por ejemplo teoría de números aplicada al diseño de tapices (Wolfram 1994: 7).

Los ACs constituyen la encarnación de una de las múltiples formas conocidas como computación emergente, definida como un patrón de conducta que resulta del procesamiento de información por parte de las celdas individuales. Esa conducta surge cuando cierto número de agentes designados para comportarse de determinada forma se involucra en interacciones locales con otros agentes, formando patrones globales de procesamiento de información que pueden percibirse cuando se los observa a un nivel macroscópico. La conducta implícita de alto nivel del sistema emerge de la conducta colectiva de individuos, estipulada explícitamente sólo a nivel individual. Los sistemas complejos son típicamente no-lineales, dado que cada unidad o agente interactúa en paralelo con otras dos unidades en los modelos unidimensionales, o con cuatro, ocho o más en las matrices bidimensionales. Observando la disposición de las unidades en un momento dado, el estudioso puede visualizar las consecuencias de la equifinalidad definida por la TGS y de la irreversibilidad de la flecha del tiempo anunciada por Prigogine: por más que se conozcan las reglas del juego, y que cada una de ellas exprese determinísticamente una determinada condición, no hay forma de retrodecir el estado anterior de las configuraciones.

A fines de la década de 1960, el matemático británico John Conway refinó la descripción del AC más simple que pudiera soportar computación general. Las células del AC bidimensional de Conway tenían sólo dos estados posibles, *'on'* y *'off'* y un conjunto de reglas también muy simple para determinar el siguiente estado del sistema. Conway llamó a su sistema "el Juego de la Vida", debido al estado binario de las células ('vivas' o 'muertas') y a las reglas de connotación "viviente" que se utilizaron. El programa de computadora de Conway (cualitativamente similar al juego del Go) ganó inmediata popularidad al ser comentado por Martin Gardner en su columna "Mathematical Games" en *Scientific American,* conocida en el mundo de habla hispana como "Juegos Matemáticos" en *Investigación y Ciencia* (Gardner 1970). Durante un tiempo la popularidad del juego pareció estacionarse en un tope de meseta, pero con la ulterior explosión de Internet hacia 1997, se difundió por todo el mundo impulsando con él a los autómatas celulares en general; hoy en día hay en torno suyo una impresionante variedad de programas de computadora (Life32, Calab, CelLab, Mirek's Cellebration), comunidades virtuales, listas de discusión y campeonatos, así como publicaciones periódicas y simposios científicos referidos al tema.

El modelo de Conway admitía además representación bidimensional en forma de tablero. Considerando las ocho celdas que constituyen el perímetro de una celda cualquiera, las reglas para le evolución temporal de la "vida" son las siguientes:

(1) Si una célula viva tiene menos de dos vecinas, muere (aislamiento).

(2) Si una célula viva tiene más de tres vecinas, muere (superpoblación).

(3) Si una célula vacía tiene tres vecinas vivas, entonces viene a la vida (reproducción).

(4) Si una célula vacía tiene dos vecinas vivas, queda como está (estasis).

Se puede entonces comenzar con una configuración al azar y examinar las clases de objetos que pueden encontrarse. La clase de conducta más simple es la de los objetos estáticos que no cambian en el tiempo, siempre que nada interfiera con ellos, y que, al ser permanentes,

se pueden usar para implementar una forma básica de "memoria"; la clase siguiente es la de las objetos o patrones periódicos, en base a las cuales, análogamente, se pueden implementar capacidades de ejecución de cálculo, necesarias para sincronizar eventos paralelos en el tiempo y para coordinar operaciones iterativas. La tercera clase de objetos es la de los patrones móviles.

La tercera y cuarta hileras de la figura 3.2 muestra los dos tipos más simples de objetos móviles, generados por el autor con el programa Life32: los de la tercera son de tipo deslizador (*glider*), que se mueven un espacio en diagonal en procesos de cuatro pasos; los de la cuarta se suelen llamar pez (*fish*) y se trasladan dos cuadrados verticales u horizontales también en cuatro pasos. Otra entidad importante es la pistola deslizadora (*glider gun*), que es un objeto capaz de generar un deslizador, y que puede ser colisionado de ciertas maneras deliberadas para generar objetos más complicados. El inventor de la pistola deslizadora fue Bill Gosper, quien cobró cincuenta dólares ofrecidos en recompensa por Martin Gardner a quien descubriera un objeto capaz de proliferar indefinidamente (Regis 1987: 285).

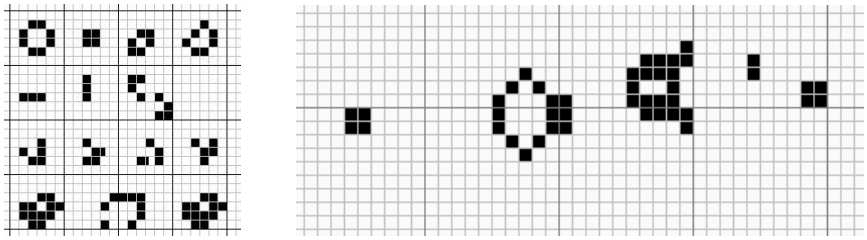


Fig. 3.2 – Objetos fijos, periódicos y móviles – Pistola de Gosper

El comportamiento dinámico de objetos periódicos y móviles, la posibilidad de moverse en forma coherente o de reproducirse, no son en modo alguno elementos de juicio que resulten evidentes a partir de la simple inspección de las reglas. Los objetos no son conjuntos fijos que se mueven en una trayectoria, sino que las partículas que lo conforman se crean y destruyen todo el tiempo. Sus capacidades sólo existen a partir de las interacciones fuertemente no lineales entre celdas vecinas, en función de sus estados, que se modifican en forma discreta pero simultánea. Incluso si restringimos la atención a un patrón de 5x5 celdas, suficientes para contener un deslizador, ninguna técnica analítica conocida podría predecir la existencia de un patrón de deslizamiento (Holland 1998: 140). Éste sólo puede descubrirse por observación, examinando la forma en que las reglas derivan en comportamientos coherentes: una matriz de 5x5 tiene, después de todo, 2^{25}, o sea más de 33 millones de configuraciones potenciales distintas.

A partir de estos principios simples pero combinatoriamente ricos es teóricamente posible construir un dispositivo en el universo de la vida que fabrique una copia de sí mismo, mantenga esa copia en movimiento y luego construya otras máquinas auto-replicadoras. Una vez que se comprueba que esta representación de la vida es capaz de auto-reproducirse, es natural pasar a considerar la forma en que también es capaz de computación universal. La idea dominante en este espacio del saber, después de todo, es tratar de desarrollar herramientas que ayuden a comprender la forma en que los sistemas naturales (desde la replicación del ADN en adelante) ejecutan sus operaciones de computación. La búsqueda consiste en elucidar las claves del trabajo de la naturaleza viva, porque resulta ser la más eficiente que se conoce.

Toda computadora digital instrumenta las operaciones de computación lógica en base a las primitivas AND, OR y NOT, que escribiremos como A∧B, A∨B y ¬A. Ilustraré de manera sucinta la forma en que se implementa la lógica en un AC bidimensional. Consideremos primero como se modela la computación de la negación lógica de una secuencia binaria, que se ilustra en la porción izquierda de la figura 3.3. La pistola deslizadora en el extremo inferior del circuito NOT emite una corriente continua de deslizadores, mientras que la fuente de datos emite un deslizador sólo cuando hay un valor de 1 en la corriente; de este modo, cuando el bit actual de A es un cero, habrá un vacío en el deslizador que proviene de la pistola. Pero cuando el valor del bit es 1, el orificio se llena con otro planeador, forzando una colisión que aniquila a ambos. El deslizador que viene de la pistola que sobrevive corresponde exactamente a las posiciones vacías de A, produciendo como salida la negación de A.

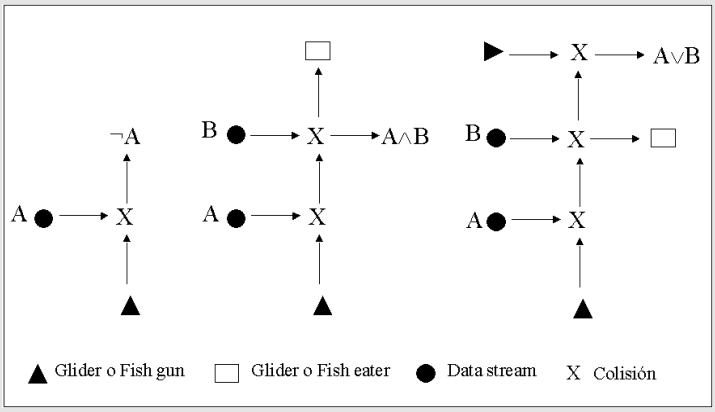


Fig. 3.3 – Construcción de primitivas lógicas

Se puede construir sobre el circuito NOT para formar una puerta AND, como se muestra en la parte media de la figura. Consideremos la colisión que ocurre justo a la derecha de B, que tiene una corriente ¬A viniendo desde abajo. Queremos que haya un deslizador que llegue a A∧B sólo cuando tanto A como B valgan 1. Si A es 1, debe haber un vacío para que B pase a través de él. Pero si A es 0, el deslizador ¬A chocará con B (si B no es 0, que lo es). El deglutidor de deslizadores (*glider eater*) arriba del circuito está allí sólo para destruir a los deslizadores anómalos. La porción derecha de la figura muestra la construcción de un circuito OR a partir de una parte del circuito AND. La salida del AND que pasa a través del destructor de deslizadores es igual a ¬A∧¬B, dado que los deslizadores de ¬A sobreviven sólo si ¬B es verdad, lo que completa el circuito. Igual que antes, la corriente anómala es destruida.

Una vez que se tiene capacidad universal de computación, se puede (según lo demostró Alonzo Church) simular cualquier sistema posible. Para realizar una computación real es necesario resolver algunos otros problemas colaterales, que incluyen cuestiones de sincronización, performance, simulación de paralelismo en máquinas de procesamiento secuencial y requerimientos de memoria; pero éstos son sólo detalles más o menos engorrosos de implementación; las capacidades fundamentales ya están en su lugar. A partir de ellas se pueden explorar fenómenos complejos, tales como sistemas mecánicos estadísticos, conjuntos químicos autocatalíticos, organismos multicelulares, colonias y super-organismos, rebaños y manadas, ecosistemas, procesos políticos y económicos, dramas sociales, cooperación y

competencia (como en el célebre dilema del prisionero), etcétera. Todo depende de la semántica que se le imponga a las entidades y a las reglas, y de la interpretación que se sepa aplicar a las configuraciones que resulten.

Un aspecto fundamental de los AC tiene que ver con su tipificación, reminiscente de la teoría de los lenguajes formales y sus autómatas derivada de Chomsky, de la tipología de *mindscapes* de Maruyama y de mi propia clasificación de los modelos con que comencé este libro. La taxonomía de los ACs involucra, asimismo, una clasificación de niveles de complejidad y clases de universalidad. Existen diversas tipologías de ACs, de las cuales referiré solamente la del físico inglés Stephen Wolfram para ACs unidimensionales y el esquema paramétrico de Christopher Langton, válido para ACs bidimensionales como el Juego de la Vida. El esquema de Wolfram (1984) consiste en cuatro clases:

(1) Clase I. Los ACs de este tipo siempre evolucionan hacia una disposición homogénea, con cada celda en el mismo estado, siempre invariante de allí en más.

(2) Clase II. Los ACs de la segunda clase forman estructuras periódicas que muestran ciclos infinitos a través de un número fijo de estados.

(3) Clase III. Los ACs de esta clase son "aperiódicos", patrones al azar que se asemejan al ruido blanco estático de la televisión, con algunos triángulos típicos aquí y allá.

(4) Clase IV. Los ACs de la última clase forman patrones complejos con estructuras localizadas que se mueven en el espacio y el tiempo. Estos patrones localizados pueden eventualmente tornarse homogéneos como los de la clase I, o periódicos, como los de la clase II.

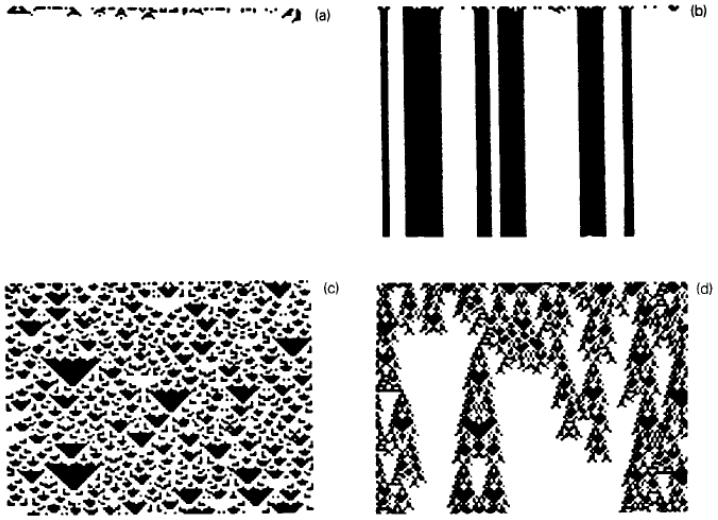
Los ACs de clase I son análogos a programas de computación triviales que se detienen al cabo de unos cuantos pasos, o a sistemas dinámicos que caen dentro de un atractor de punto fijo. Un atractor es un conjunto de puntos hacia el cual son atraídas las trayectorias de un sistema a lo largo del tiempo; también se lo puede definir como un conjunto de puntos en un estado de fases correspondiente a los sucesivos estados de un sistema (Baumol y Benhabib 1989: 91). El ejemplo de atractor de punto fijo más obvio es el péndulo, o la regla 254.

Los ACs de la clase II son repetitivos y muestran semejanza a programas que ejecutan bucles infinitos, o a sistemas dinámicos que caen dentro de ciclos límites, periódicos o cuasi-periódicos. Los autómatas de las clases I y II corresponden a las gramáticas de lenguajes regulares o sistemas sóficos, que no requieren memoria. Ejemplos son las reglas 254 o 90.

Los ACs de la clase III son tan absolutamente azarosos que no muestran ningún patrón gráfico interesante, pero poseen una particularidad: son extremadamente sensibles a las condiciones iniciales: si se comienza una partida conmutando el orden de un par de celdas, la conducta resultante será absolutamente distinta. En este sentido se asemejan a programas generadores de números seudo-aleatorios. Wolfram destaca su correspondencia formal con las gramáticas sensibles al contexto. Algunos generan ruido estático azaroso de grano fino, otros producen estructuras fractales, simétricas o asimétricas, semejantes a triángulos de Sierpiński o al triángulo de coeficientes binomiales de Pascal. Un ejemplo es la regla 30.

Los de la clase IV son de lejos los más fascinantes. Pueden ejecutar computaciones, y algunos de ellos son capaces de computación universal. En cuanto a su evolución temporal, ésta es difícil de describir; no es regular, ni periódica, ni aleatoria, sino que contiene un poco de todos esos tipos de conducta. Sucede como si la conducta dinámica de estos ACs oscilara entre el caos y la periodicidad; son además *irreducibles*: no hay atajos para predecir su conducta. Wolfram demostró que los autómatas complejos generan patrones fractales autosimi-

lares de dimensión 1.59 o 1.618, y especula que esa capacidad puede brindar indicios que expliquen la presencia casi universal de estructuras autosimilares en los sistemas naturales. Los ACs de esta clase incluyen el Juego de la Vida y equivalen a una máquina de Turing y a los lenguajes irrestrictos en la jerarquía de Chomsky (Wolfram 2002: 231-249).



3.4 – Las cuatro conductas de Wolfram

La imagen muestra los comportamientos definidos por Wolfram para cada una de las cuatro clases de universalidad: (a) punto fijo, (b) periódica, (c) caótica y (d) compleja, al cabo de un cierto número de iteraciones a partir de valores iniciales definidos al azar (Wolfram 1988). Más recientemente Wolfram (2002), basándose en ACs unidimensionales de 8 celdas en anillo, desarrolló una sistematización de las 256 reglas posibles, encontrando que la número 110 de su especial clasificación es el modelo más simple conocido hasta hoy capaz de computación general.

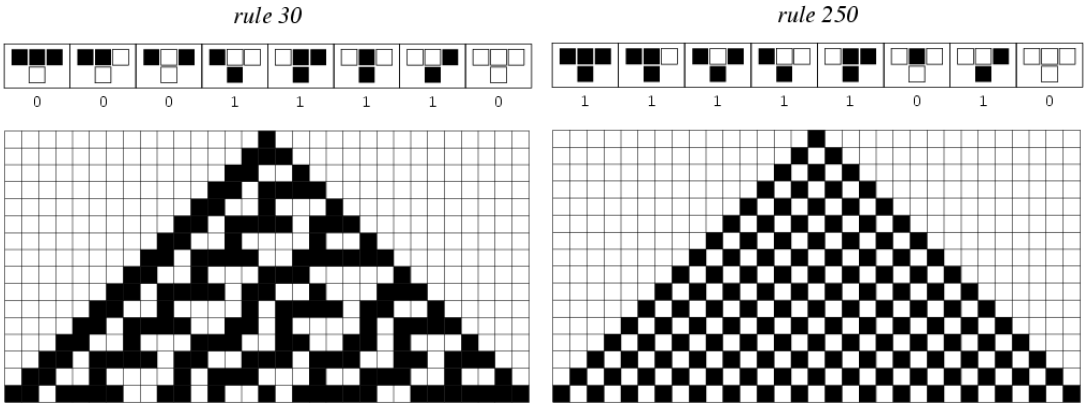


Fig 3.5 – Reglas de autómatas celulares de Wolfram

La notación de las reglas en los ACs de Wolfram es fácil de entender: ocho dígitos binarios permiten expresar los números desde 0 hasta 255. Teniendo en cuenta la vecindad de Moore de la generación anterior de una celda y las dos celdas vecinas (o sea r==1), la regla 1 establecería que la generación actual debe ser 00000001, la regla 30 es 00011110, la regla 255 sería 11111111, etcétera. Un valor 0 denota una celda muerta, que se simboliza en color blanco; un valor 1 es una celda viva y se pinta en negro. La figura 3.5 muestra a la izquierda la configuración de la regla 30 según Wolfram (2002: 55) y su comportamiento a

partir de una sola celda viva en la primera generación; a la derecha reproduzco la regla 250. Podría explicarse el funcionamiento de cada regla en términos de distintas operaciones binarias, pero creo que es más simple mirar las dos hileras que definen como se aplica una regla y luego analizar cómo es que se ha generado la segunda línea de cada corrida. Diferentes clases de reglas poseen capacidades lógicas y matemáticas específicas. Esta sencilla forma de codificación y tipificación de las reglas es la clase de elemento de juicio que una presentación inadecuada como la de Francisco Varela (1990: 66) deja sin explicar. El lector puede ahora experimentar el comportamiento de cada uno de los 256 ACs binarios o 512 totalísticos configurando las reglas correspondientes en cualquier programa disponible de ACs, como Life32 o el versátil Mirek's Cellebration.

El "parámetro lambda" de Chris Langton agrega a la clasificación de Wolfram una dimensión visual suplementaria, aunque hay que señalar que, por lo menos al principio, Langton no intentó establecer una relación formal entre ambas tipologías.

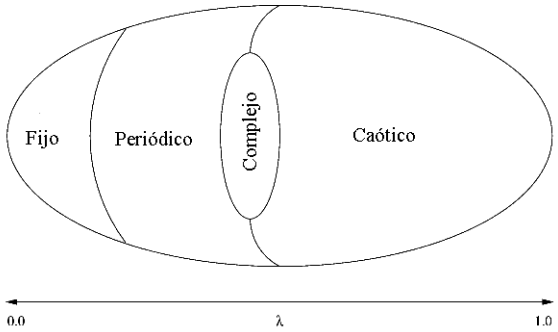


Fig. 3.6 – Esquema de Langton del espacio de reglas

La figura 3.6 muestra una representación esquemática del espacio de reglas caracterizado por el parámetro λ. Para la definición de este parámetro, Langton estableció primero el concepto de "estado de quietud" de una celda. Luego consideró todas las reglas que mapean una configuración de vecindad en otra. Las reglas mapearán sobre celdas en dicho estado, o sobre celdas que se encuentran en un estado distinto. Siendo *r* el radio de una vecindad relevante, el número total de entradas en una tabla de reglas sería k^{2r+1}, que por comodidad voy a llamar *N*. Dado un número de reglas que mapea sobre estado de quietud n_q, se define el parámetro como la fracción de todas las reglas que mapean en un estado de no-quietud:

$$\lambda = \frac{N - n_q}{N}$$

El valor de λ puede variar entonces entre 0 y 1. Un valor λ igual a cero implica que todas las reglas mapean sobre estado de quietud; con λ igual a uno, todas las reglas lo hacen sobre el estado inverso. El primer valor corresponde al estado más homogéneo, el segundo al más heterogéneo. Aunque el procedimiento matemático efectivo es un poco más complicado, se puede estimar que un valor de λ de 0.4 a 0.5 cae en las cercanías de la región compleja.

Lo importante es que Langton definió cuatro tipos (Fijo, Periódico, Complejo y Caótico) y los relacionó metafóricamente con los cuatro estados de la materia: los puntos fijos son como cristales, estáticos y ordenados, y resultan de reglas homogéneas; la dinámica caótica es similar a los gases, que sólo pueden ser descriptos estadísticamente. La conducta periódica es semejante a un sólido no cristalino, y la complejidad es como un líquido próximo tanto al

estado sólido como al gaseoso. De este modo, se puede entrever la complejidad y la computación como entes que existen en el límite entre el caos y la simplicidad, en el punto de transición entre lo estático y lo caótico. También queda sustentada la intuición de que "la conducta compleja involucra una mezcla de orden y desorden" (Langton 1991: 32). Incidentalmente, Langton (inventor del concepto de vida artificial) ha sido quien impuso un nombre para el tipo complejo, que es el que se manifiesta en la región que se encuentra "al filo del caos" (Waldrop 1992: 230). Las organizaciones que se encuentran en esa región serían las llamadas caórdicas (dado que están entre el *caos* y el *orde*n), estructuras que mezclan armoniosamente características de ambos atractores, competencia y cooperación, y que son las más características de (aunque no están confinadas a) los sistemas vivientes. Son además regiones para las cuales no existe una descripción breve y unitaria expresada según nuestros procesos acostumbrados de percepción visual, dado que presentan una enorme variedad de patrones. Entre paréntesis, existe un fiero debate mediático en torno a las formas fuertes de vida artificial que he decidido no abordar aquí (Emmeche 1992; Rennard 2004).

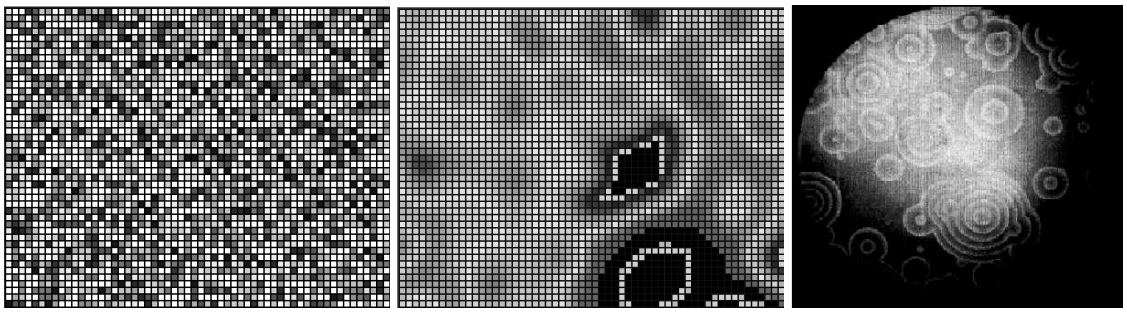


Fig. 3.7 – Regla de mescolanza: estado inicial y fase – Reacción BZ

Así como los ACs han puesto de manifiesto la impotencia de la deducción y la intuición para efectuar predicciones o para describir situaciones interactivas inicialmente simples, también han demostrado el surgimiento (asimismo impredecible) de lo que Prigogine llama "orden a partir del caos", Stuart Kauffman "orden gratis", Henri Atlan *hasard organisateur*, Heinz von Foerster "orden a partir del ruido", Max More "orden sin ordenadores" y Tom Morrow "extropía". Algunas reglas de transición que exhiben este principio son la regla de mescolanza (*hodgepodge*) imaginada en 1989 por David Gerhard y Heike Schuster, de la Universidad de Bielefeld. Esta regla pretende modelar la reacción catalítica de Belusov-Zhabotinskii, de la que se ha dicho que viola la segunda ley de la termodinámica. Se trata de una reacción que no evoluciona hacia un estado homogéneo de máxima entropía, sino hacia variaciones periódicas de tipo reloj químico, mostrando olas y espirales que se propagan en la superficie de la solución. Durante muchos años se estimó imposible que existiese una reacción inerte que no se asentara nunca en un estado estable y que presentara efectos de duplicación de períodos como los que se encuentran en dinámica de poblaciones, u oscilaciones que, al graficarse, trazan una figura fractal conocida como la "escalera del diablo" (Scott 1991: 110-116). La figura 3.7 muestra el estado inicial de un AC que simula la regla de transición de Gerhard-Schuster, una instantánea de su estado ulterior al cabo de unas cuantas iteraciones y una foto original de los estudios soviéticos de relojes químicos de la década de 1950. La regla de mescolanza y las que producen efectos de auto-organización se vinculan a otros formalismos bien estudiados como los modelos de votantes o reglas de la mayoría (*majority rules*), la dinámica de la tensión superficial y los modelos de simulación de templado (*simulated annealing*). La regla totalística de voto (inventada por Gérard Vichniac) es apreciada por los especialistas porque tiene, como dice Rudy Rucker, "un toque de

vida real"; en ella una minoría grande se impone a una pequeña mayoría y las fronteras entre zonas son inestables.

Existen, naturalmente, diversas clases especiales de ACs. Los más simples son los binarios; algo más complejos son los totalísticos, introducidos por Wolfram en 1983, en los cuales los valores de una celda dependen de los valores promedios de las celdas de la vecindad; en los autómatas totalísticos el valor de las celdas se suele codificar con dos, tres o más colores. Mientras la forma canónica de los ACs es cerrada y se basa en interacciones entre agentes o celdas, hay una variedad italiana de ACs abiertos y asincrónicos que se ha dado en llamar ACs disipativos. Recientemente Wolfram ha sistematizado una mega-tipología de ACs y entidades afines, que congrega a autómatas de bloque, máquinas celulares de Turing, autómatas móviles, sistemas de sustitución, sistemas de etiquetado (*tag*), sistemas multivías y máquinas de registro (http://atlas.wolfram.com). Todavía no se ha asimilado este repertorio en la ciencia de la complejidad, por lo que las ciencias sociales tendrán que esperar hasta que se ponga en claro su relevancia para la investigación empírica.

3.1.2 – Autómatas celulares en ciencias sociales

Habría que admitir, desde el principio, que no todas las ideas antropológicas serán susceptibles de expresarse con facilidad en términos de ACs, ya que nuestra conceptualización tradicional se orienta más a la descripción detallada de lo que sucede, a su tipificación en clases más o menos obvias, o a interpretaciones que son siempre lineales, simples e intuitivas, que a la búsqueda de las reglas que generan sucesos, o a la inspección de las consecuencias de un estado de cosas. Pero incluso en un tablero de 5x5 regido por una regla tonta, los efectos pueden ser varios órdenes de magnitud más complicados de lo que estamos habituados a pensar en nuestra disciplina, por más que nos hayamos jactado durante un siglo de poseer el objeto más complejo de todos. Escribe Holland:

> Aún un número limitado de componentes y reglas generan más posibilidades de las que puede revelar una vida de trabajo con lápiz y papel. De esta forma, la docena de reglas o algo así de juegos como el ajedrez o el Go, o los cinco axiomas de la geometría de Euclides, siguen deparando sorpresas después de siglos de estudio (Holland 1998: 166).

Clifford Geertz y Victor Turner proponían recurrir a la metáfora del juego como una heurística propicia para la interpretación cultural. Ciertamente, se trata de la noción antropológica que se orienta con más naturalidad hacia modelos del género de autómatas y agentes. Pero no creo que ellos se hayan planteado alguna vez la posibilidad de que esa clase de metáforas acarreara el surgimiento de escenarios de semejante complejidad. La evidencia indica que dichos pensadores creían que para resolver los problemas de la emergencia a partir de interacciones entre agentes sólo sería necesario un poco de ingenio, tiempo para rumiar unas cuantas reflexiones y, en caso extremo, un diagrama a mano alzada que apoyara la representación. En una disciplina que ha encontrado aceptables estas premisas, es milagroso entonces que exista un buen número de experiencias con este formalismo.

Una forma natural de indagar lo que puede lograrse con estos modelos es tomar nota de los experimentos que se han hecho con ellos. Además de toda suerte de problemas matemáticos y computacionales, se los ha usado para indagar fenómenos de contagio y difusión, propagación de fuegos forestales y rumores, redes de intercambio, transacciones financieras, técnicas de diseño textil, desarrollo de estructuras cristalinas, criptografía, patrones de coloración de conchas de moluscos, polución ambiental, desarrollo urbano, disipación y disemina-

ción en dinámica de fluidos, además de las cuestiones socioculturales que ejemplificaré más adelante; muchos problemas que son formalmente intratables por medios analíticos, o que son susceptibles de resolución pero en escalas de tiempo inadmisibles, admiten un tratamiento con ACs que por lo menos ayuda a su comprensión. El antropólogo debería saber además que estos modelos han introducido cambios epistemológicos sustanciales en las propias matemáticas de la complejidad, devenida ahora una ciencia más experimental que abstracta; privada de la posibilidad de establecer principios invariantes, estas matemáticas exigen no sólo una nueva forma de intuición, sino la necesidad de ejecutar materialmente los modelos para poder determinar los patrones emergentes (Wolfram 2002: 39-41).

Igual que sucedió con el cálculo estadístico, el modelado con ACs comenzó antes en las ciencias sociales que en las matemáticas puras. James Sakoda fue el primer autor, que yo sepa, que desarrolló un modelo de AC aplicado a la sociedad. La literatura técnica sobre autómatas de su época no registró la existencia de su modelo, ni en éste se menciona tampoco ninguna investigación previa en ese terreno. Sakoda bautizó su criatura como el "modelo del tablero de damas" (*checkerboard model*), y lo publicó recién en 1971, aunque sus bases ya se encontraban completamente desarrolladas en una disertación inédita de 1949 (Sakoda 1949; 1971). Su objetivo era comprender la formación de grupos sociales, en el contexto de la interacción humana en centros de relocalización de japoneses en Estados Unidos durante la segunda guerra, inmediatamente después del ataque a Pearl Harbor.

En el modelo de Sakoda los miembros de dos grupos viven en un tablero. Poseen actitudes positivas, neutras o negativas hacia cada otro sujeto, llamadas valencias, a las que se asignan valores enteros. V_{ij} es la valencia de un individuo j hacia un individuo i. P es el conjunto de todos los individuos; cada uno de ellos tiene la oportunidad de trasladarse a un sitio vacío en su vecindad mooreana de 3x3. Si no hay celdas vacías puede saltar por encima de otro, pero la migración es local o sólo se permite dentro de ciertos límites. Un individuo usa una opción de migración para moverse a un lugar donde se maximice:

$$\sum_{j=P} \frac{Vij}{\sqrt[w]{d_j^2}}$$

donde d es la distancia euclideana entre I y j; w determina la fuerza con que las valencias disminuyen conforme a la distancia; cuanto mayor es w, menos disminuyen. La figura ilustra el comportamiento del principio llamado "valencia de segregación" (Sakoda 1971: 127):

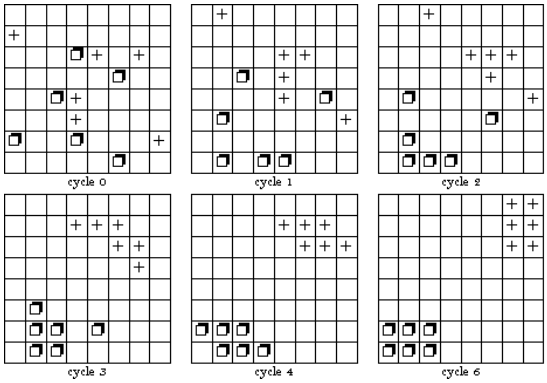


Fig 3.8 – *Checkerboard model*, valencia de segregación

Este resultado no es en sí sorpresivo, pero la dinámica de la "sospecha" (Sakoda 1971: 126) sí lo es:

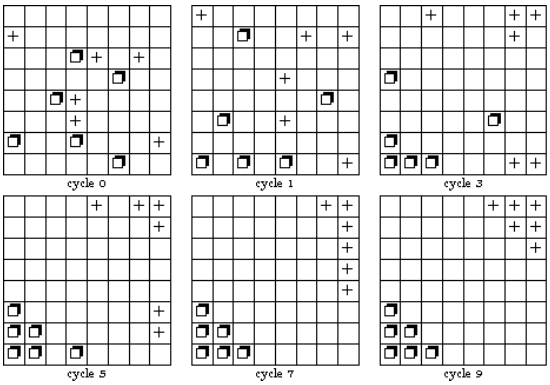


Fig. 3.9 – *Checkerboard model*, dinámica de la sospecha

Experimentando con el tablero de Sakoda, Rainer Hegselmann encontró que una actitud negativa hacia el otro grupo, combinada con indiferencia hacia el grupo de pertenencia, puede conducir hacia conglomerados mucho más densos que los que resultan de sentimientos positivos hacia el propio grupo. Esa conclusión es imposible de deducir a ojo desnudo, pero es susceptible de verificarse en el modelo.

Otro de los estudios sociológicos tempranos que explotó el modelado con ACs es el de Thomas Schelling (1969), en el que se analizan procesos de segregación racial o cultural en un marco que bien puede ser considerado un AC unidimensional. La semántica del modelo es simple y la definición intuitivamente satisfactoria. Los individuos pertenecen a dos clases diferentes (blanco y negro, o asteriscos y ceros); su vecindad es un cierto número de celdas a la izquierda o la derecha; las celdas tienen opciones de migración: acostumbran migrar de su vecindad cuando ésta no tiene las relaciones numéricas deseadas (por ejemplo, cuando su clase constituye una minoría en esa vecindad). En caso que el requerimiento no sea satisfecho, el individuo se moverá a un vecindario donde sí lo sea.

Un par de años después de propuesto ese modelo, Schelling (1971) desarrolló otro parecido también en versión bidimensional. Ambos trabajos llegan a conclusiones similares, consistentes con la lógica de los sistemas complejos; una de las más interesantes expresa que las reglas aplicadas a nivel micro por los agentes individuales pueden producir efectos macro que nadie tenía la intención de provocar. De este modo, se puede manifestar una segregación total a partir de acciones de nivel local que no tenían en absoluto el propósito de separarse de las otras clases. Alcanza con aspirar a que un tercio de los vecinos sean de la misma raza para que se generen fuertes esquemas locales de segregación. Ni Schelling ni Sakoda utilizaron el término "autómata celular", sino el de *checkerboard model*; en ambas clases de modelo, empero, se presentan las mismas características de espacio y tiempo discretos, y adquieren importancia la vecindad y la ubicación. Es importante destacar que Schelling no es un estudioso de segundo orden, sino una de las figuras más reputadas de los centros de estudios avanzados de Harvard, Yale y Maryland, y uno de los referentes mundiales en materia de carreras armamentísticas, estrategia militar, crimen organizado y extorsión, política ambiental, política internacional y conflicto (usando teoría de juegos) discriminación racial, energía y políticas de drogas y tabaco. Recientemente, Chris Cook ha desarrollado una aplicación de prueba de las teorías de la segregación de Schelling utilizando el framework .NET de Microsoft y lenguaje C#, y sus modelos se encuentran eventualmente

disponibles en Internet. En esta clase de estudios es frecuente y posible que un autor tome los datos y las reglas de otro y lo someta a pruebas y condiciones distintas, descubriendo consecuencias imprevistas en la formulación original.

Entre los estudios más recientes, los psicólogos Andrzej Nowak, Jacek Szamrej y Bibb Latané (1990), vinculados al prestigioso Centro de Estudios Complejos (ISS) de la Universidad de Varsovia en Polonia, desarrollaron un modelo bidimensional para la evolución de actitudes. El mecanismo básico de ese modelo establece que los individuos se apegan a determinadas actitudes, pero pueden llegar a variarlas dependiendo del número, fuerza y distancia de todos los vecinos suyos que tengan otra actitud. Mediante ese modelo es posible entender, por ejemplo, la forma en que opiniones propias de una minoría pueden sobrevivir si encuentran la oportunidad de formar un conglomerado y convertirse en una mayoría local. Esta clase de modelos suele implementarse bajo reglas de la mayoría (*majority rules*) o modelos de voto: en una vecindad de Moore, una celda muere si sus vecinas son exactamente cinco o menos de cuatro. Los patrones que se generan son similares a las de los modelos de simulación de templado que se verán más adelante.

En economía, Donald Keenan y Mike O'Brien (1993) de la Universidad de Georgia utilizaron un modelo unidimensional para analizar dinámica de precios y formación de carteles a partir de firmas en competencia en un escenario territorial. Martin Nowak y Robert May (1992, 1993) estudiaron la dinámica de la cooperación en un modelo bidimensional, utilizando juegos de pares de personas como pieza individual. En base modelos semejantes, May (el descubidor de la naturaleza caótica de la ecuación logística) predijo con exactitud las tasas de difusión del SIDA en Africa. Los trabajos posteriores de ambos autores combinan estrategias de ACs con modelos caóticos para estudiar procesos de propagación viral, evolución del lenguaje y otros fenómenos. Ewa Bruch (1994) y Oliver Kirchkamp (1994), ambos de la Universidad de Bonn y especialistas en microsimulación de procesos sociales, igual que David Messick y Wim Liebrand (1995), y Andreas Flache (1999) de la Universidad de Groningen, siguieron la misma línea de estrategia de simulación, pero de manera más sofisticada y con reglas más ricas, incorporando variables de distancia en la dimensión de vecindad. Viçens Quera, Antoni Solanas y otros estudiosos del Departamento de Ciencias del Comportamiento de la Universidad de Barcelona elaboraron en 1998 una aplicación de AC que implementa un modelo proxémico de migración; en sus cátedras de doctorado realizan habitualmente trabajos relativos a modelos basados en agentes para estimación de parámetros en sistemas sociales o para análisis de procesos de cooperación.

Una ilustración refinada de la capacidad de autómatas celulares en nuestras disciplinas se puede encontrar en los modelados de dinámica social y otros procesos realizados por uno de los mayores especialistas en este rubro, Rainer Hegselmann (1996; 1998), profesor de filosofía en la Universidad de Bayreuth. Hegselmann (1998: 40) proporciona una conveniente matriz de correspondencias (tabla 3.1) que ayuda a comprender las analogías entre el formalismo de los ACs y las problemáticas del cambio social.

Por su parte, Nicholas Gessler (1994), del Human Complex System Center de la Universidad de Los Angeles, ha desarrollado todo un marco (y un popular sitio de web) consagrado al concepto de Cultura Artificial y al modelado extensivo de fenómenos culturales y de geografía humana utilizando esta y otras tecnologías de programación, tales como algoritmos genéticos, inteligencia artificial distribuida y modelos multi-agentes. La perspectiva de

Gessler es más tecnológica y lúdica que cultural, pero ha producido herramientas que podrían llegar a usarse en el momento apropiado de una investigación.

	Autómatas celulares	Dinámica social
Unidades básicas	Las celdas son las unidades básicas o los átomos de un AC	Los individuos son las unidades básicas de la sociedad
Estados posibles	Las celdas se encuentran en estados tomados de un conjunto de estados posibles	Los individuos realizan ciertas elecciones, adoptan ciertas actitudes y operan de ciertas maneras emocionales
Interdependencia	El estado de una celda central afecta a los estados de sus vecinos y viceversa	Los individuos se afectan mutuamente
Localidad	Las reglas de transición son locales	Los individuos sólo se afectan entre sí localmente, en una cierta vecindad, y la información sobre ellos es también local
Superposición	Las vecindades se superponen	A menudo las interacciones poseen una estructura superpuesta
Aplicaciones y tareas	Aplicaciones en matemáticas y física: – Modelado de orden y emergencia – Efectos macro explicados por reglas micro – Modelado de procesos dinámicos	Tareas pendientes para la comprensión de fenómenos sociales: – Comprensión de emergencia y orden – Comprensión de relaciones micro-macro – Comprensión de dinámica social

Tabla 3.1 – Autómatas celulares en ciencias sociales según Hegselmann

Otra exploración fascinante en la utilización de autómatas celulares ha sido la del antropólogo Ron Eglash en *African fractals* a propósito de los tableros del juego *owari*, que se conoce desde Zimbabwe hasta Etiopía con diversos nombres: *ayo bao, giuthi, lela, mancala, omweso, tei, songo* (Eglash 1999: 101-108). Otros autores, estudiosos y aficionados, así como museos y diversas organizaciones, aportan otras referencias; con nombres como *awale* y *warri* se lo ha visto jugar en Mombasa, Lome, Mali y todos los lugares entre ellos (Rabagliatti s/f); el Museo de Waterloo en Ontario, en sus páginas sobre juegos etnográficos, así como Harold James Ruthven Murray (1952) en un libro curiosamente dedicado a los "juegos de tablero que no son ajedrez" lo documenta como *wari* y *warri* en Antigua, *oware*, *anana* y *ba-awa* en Ghana, *awèlé* en Côte d'Ivoire, *mancala* en Líbano, *adi* en Nigeria y *omweso* en Uganda, donde hoy existe una sociedad internacional con páginas institucionales en http://www.omweso.org, paralela a la sociedad de *oware* con sede en Londres.

Quien haga un rastreo de etno-juegos análogos al *owari* en Internet no acabará jamás de cubrir las variantes (*adi, adji, awale, awèlé, ayo, ayo-ato, bakong, bantumi, bao, congklak, count and capture, gepeta, ise-onzin.egbe, kala, kiarabu, mehufva, mueiso, ouri, ourin, pallanguli, tchuma ruma, tam-puduo, trysse*), las versiones para computadora (Awala, Bantumi, Kahala, Mancala 2000), estudios académicos, publicaciones periódicas con y sin referato (*Board Games Studies, Abstract Games Magazine*) y todo lo que puede concebir la imaginación. Es obvio que se trata de un juego muy antiguo; ningún estudioso de los que he consultado arriesga fechas, pero puede afirmarse con seguridad que el *owari* se jugaba en las sociedades africanas mucho antes que en Occidente se comenzara a pensar en autómatas celulares o que desde Oriente llegara el ajedrez, por cuanto han encontrado versiones sumerias en las excavaciones de Ur, hoy en día en el Museo Británico, y en el templo de Kurna en Tebas. La figura 3.10 muestra diversas clases de tableros de distintas culturas.

Debemos a Eglash la idea de que el tablero de *owari* es un análogo perfecto de un autómata celular unidimensional en el cual se manifiestan patrones de auto-replicación casi idénticos

a los del modelo original de von Neumann. El "grupo en marcha" del *owari* de Ghana, por ejemplo, es un método recursivo que reproduce un patrón de distribución de piedras o semillas en los cuencos del tablero al cabo de cierto número de iteraciones. Yo lo encuentro formalmente análogo a un planeador o un pez del juego de la vida, lo que remontaría la idea de las máquinas auto-replicadoras muy atrás en una historia multicultural que habrá que escribir algún día. En uno de los infinitos sitios de Internet, incidentalmente, alguien expresó hace poco que "ningún otro juego refleja la vida igual que el *oware*"; en otro se señala que el juego refleja las reglas y simboliza la historia de la vida.

3.10 – Mancalas de Sierra Leone (extremos), oware de Ghana (centro)

Los tableros de *owari*, que son estupendas piezas de artesanía, vienen además decorados con diseños en doble espiral reminiscentes de las cornamentas de los carneros del norte de Africa, considerados en Ghana como un modelo generalizado de la vida. Eglash ha encontrado correspondencias estructurales profundas entre las espirales logarítmicas de este emblema y los principios matemáticos que rigen el juego, en el cual se presentan análogos de los atractores de punto fijo, los atractores periódicos y las cuencas de atracción que son familiares en dinámica no-lineal. Si mal no interpreto su razonamiento, podría decirse que en el "grupo en marcha" del juego unidimensional de *owari* y en los patrones bidimensionales de la doble espiral está operando el mismo principio constructivo, situación que no es perceptible de inmediato y que, dada su especificidad estructural, sería improbable que se trate de una correspondencia fortuita. Tanto en el juego de *owari* como en la ornamentación de los tableros y en los autómatas celulares, se manifiesta un principio de recursividad: bucles de realimentación que generan nuevas estructuras en el espacio y nuevas dinámicas en el tiempo. Hay aquí un rico simbolismo etno-matemático al que recién se está comenzando a comprender. Alguna vez existió, hace décadas, una etnografía de los juegos; con lo que hoy se sabe (y con semejantes herramientas) no sería insensato pensar en formularla otra vez, al menos para un grupo importante de juegos de tablero.

El infatigable Stephen Wolfram, autor de las investigaciones más profundas y extremas en el comportamiento de los ACs, proporciona algunas analogías interesantes entre diseños arqueológicos, etnográficos, ornamentales y artísticos de distintas épocas y patrones emergentes en algunas de sus criaturas virtuales. Entre sus ejemplos cabe mencionar los ornamentos en zigzag de un brazalete de marfil de mamut paleolítico de 24 mil años de antigüedad; los patrones decorativos tricolores de las columnas de los templos mesopotámicos; los diseños laberínticos de una tableta del palacio de Pylos en Grecia con patrones similares a los de los graffiti de Pompeya, el piso de la catedral de Chartres y tallas precolombinas de Perú; los mosaicos de un complejo romano del siglo II DC; la decoración de la mezquita de Córdoba en España; rosetas, ventanas y mosaicos góticos con diseños anidados complejos, además

de motivos textiles, reglas de lógica y formas diversas en logotipos tribales, poesía, música, juegos y laberintos (Wolfram 2002: 43, 872-875).

Wolfram se plantea la posibilidad de que muchos de esos diseños ordenados sean fruto de la aplicación de pautas definidas simples, iterativamente o en anidación, así como restricciones (*constraints*) o gramáticas, análogas a las reglas que rigen el comportamiento de los autómatas. La tipología de los autómatas y sus reglas correspondientes podrían proporcionar un marco nomenclatorio, clases de universalidad y un mecanismo comparativo casi axiomático para un sinnúmero de formas; no para todas, desde ya, ni para la mayoría, pero sí para unas cuantas. El artista fractal Clifford Pickover (1990: 227-247, 295-312) ha insinuado algunas aplicaciones de técnicas semejantes a éstas, pero en general el concepto está sin desarrollar, como esperando que los estudiosos del arte y el diseño cultural se decidan a explorar la cuestión. Esta idea proporciona una forma alternativa de tratamiento de ciertas clases de imágenes, a veces muy comunes, otras extraordinarias, pero casi siempre refractarias al análisis en términos de geometría convencional.

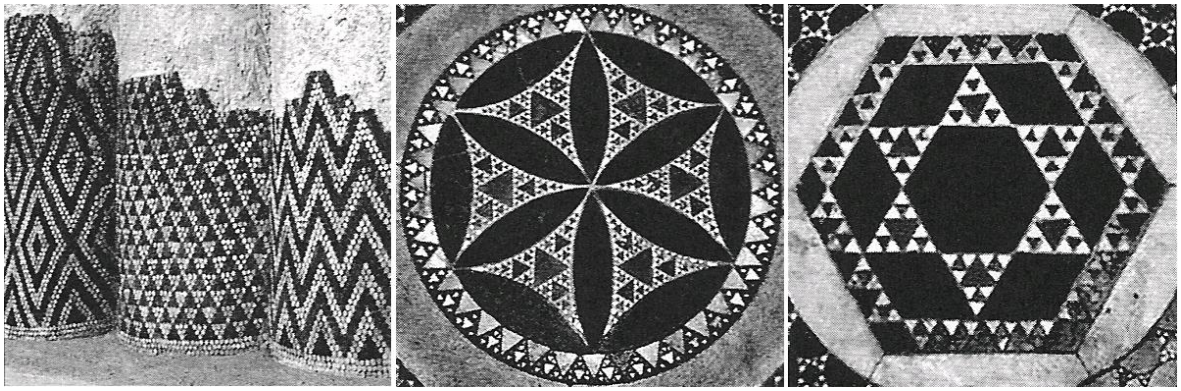
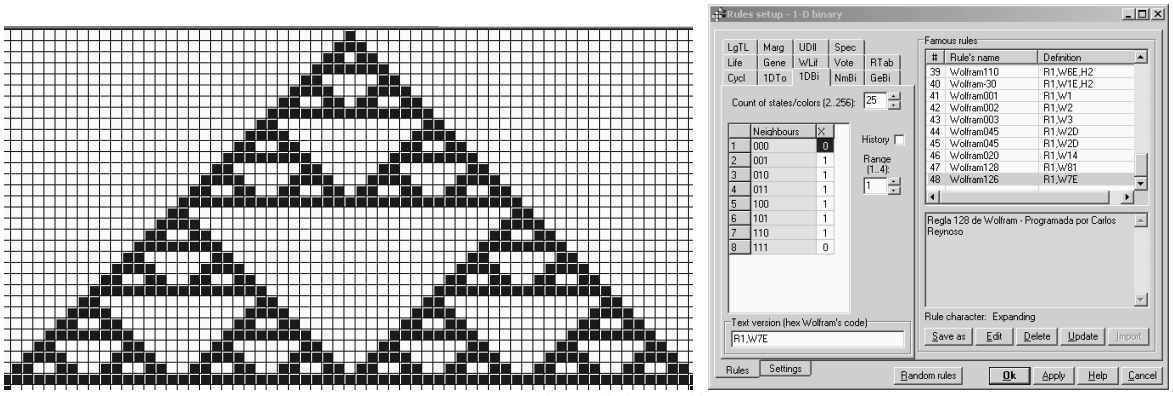


Fig. 3.11 – Patrones celulares en la cultura

La figura 3.11 ilustra motivos susceptibles de sintetizarse en ACs elementales o totalísticos; el primero corresponde a la decoración del templo de Eanna en Uruk, el ejemplo más temprano que se conoce de decoración en mosaico; los otros dos, a los motivos ornamentales del piso de la catedral de Anagni, compuestos alrededor del año 1226 (o 1104 según otras fuentes), uno de los pocos casos existentes de configuración artística antigua con tres niveles de anidación. Estos últimos ejemplos ilustran patrones familiares que se manifiestan con regularidad en la experimentación con ACs; un especialista idóneo en estos menesteres no titubearía en clasificarlos como típicos de la regla 126 de los autómatas unidimensionales.



3.12 – Regla 126 de Wolfram

Quienes estén familiarizados con fractales los vincularán con triángulos de Sierpiński o conjuntos de Cantor. La ejecución de dicha regla en un autómata celular luciría como la de la figura 3.12, generada con Mirek's Cellebration. La imagen de la derecha muestra la caja de diálogo para su codificación; no me interesa detallar las prestaciones de un programa informático en particular, sino dar una idea del trabajo que insume la síntesis de patrones con tecnología de autómatas celulares: todo lo que hay que codificar es la serie de ceros y unos que definen (en base binaria) el número decimal 126 (o sea 01111110), o bien R1W7E (Rango 1, Wolfram 126) en hexadecimal. En otros programas, como VisionsOfChaos, se selecciona directamente el número en notación decimal.

Llamo la atención sobre el hecho de que la regla de Wolfram produce no ya un modelo aproximado del patrón gótico, sino *exactamente* el mismo patrón conceptual, incluyendo un triángulo pequeño que no llega a realizarse más que como rectángulo por falta de resolución en el tamaño de los mosaicos. El diseño surge claramente de la aplicación de reglas. Se trata de un caso similar al de los artistas musulmanes de la época, que explotaron en la Alhambra las 17 reglas de simetría que son posibles de acuerdo con la moderna álgebra de grupos.

Para los arqueólogos y antropólogos que estudian relaciones en el espacio y el tiempo será de gran utilidad echar una mirada a los estudios geográficos y ecológicos basados en ACs. La bibliografía que se ha ido acumulando sobre el particular es enorme y nuevas investigaciones se realizan literalmente todos los días; es ya evidente que el modelado emergente se ha afianzado en esas disciplinas como una forma usual de trabajo, acaso la más normal de todas en lo que va del siglo. Algunas temáticas desarrolladas han sido simulación de tráfico, urbanización a escala regional, dinámica del uso de la tierra, policentralidad, urbanización histórica, desarrollo suburbano, segregación, propagación de plagas, estrategias ecológicas, dinámica socioespacial, surgimiento y expansión de barrios precarios. Un buen porcentaje de los trabajos se publican en revistas especializadas, en particular *Environment and Planning B* o los *CASA Papers* del University College de Londres. El volumen de estas producciones excede la posibilidad de referirlos aquí; en todo caso, dos de los investigadores más destacados en el área son Michael Batty y Paul Torrens, ambos de CASA-UCL. A mi juicio, ellos han abordado las cuestiones epistemológicas involucradas en el modelado con sistemas complejos, incluidas sus limitaciones técnicas, con más agudeza que lo que ha sido el caso en las disciplinas donde se originaron los formalismos (p. ej. Torrens 2000; O'Sullivan y Torrens 2000). Uno de los riesgos que han entrevisto en el uso de estos modelos concierne a la posibilidad misma de "enriquecer" o "naturalizar" demasiado su semántica y su operatoria; cuando los modelos se vuelven excesivamente realistas y detallados, capturando rasgos que no son esenciales, su gestión se vuelve tanto o más intratable que el trabajo directo con la realidad material (Kadanoff 1979: 478).

Cabe concluir que los ACs constituyen una herramienta de modelado de evidente utilidad para cualquier disciplina que busque comprender mejor los procesos complejos, la aparición de propiedades emergentes y las relaciones entre el macronivel y el nivel individual, los patrones de conjunto y los individuos. Los ACs permiten poner los principios de la ciencia de la complejidad a la mano y ante los ojos. Aún cuando se pueda reputar de abstracta e tortuosa la forma de representación de los procesos, a través de los ACs el estudioso tiene mucho que ganar en la comprensión estructural de esa clase de fenómenos y en el examen reflexivo de la articulación interna de las formas posibles de cualquier teoría de la complejidad, actual o futura.

3.1.3 – Auto-organización en Redes Booleanas Aleatorias

Las redes booleanas aleatorias (RBA) son más genéricas que los ACs, que pueden considerarse una clase especial de aquéllas; esto significa que cualquier AC se puede mapear en una red booleana específica. A diferencia de los ACs, que se comportaban todos conforme a una sola clase de regla, simple o elaborada, los elementos de una RBA se rigen por una tabla de reglas que le permite a cada autómata tener una regla distinta, asignada al azar. Las RBA fueron propuestas inicialmente por el biólogo Stuart Kauffman desde 1969 como modelo de una serie de fenómenos observables en los sistemas biológicos, y peculiarmente en los genes y el ADN (Gershenson 2004). Estas ideas y metáforas vinculan a este formalismo con el algoritmo genético, que se revisará después.

Incidentalmente, las RBA habían sido prefiguradas por Alan Turing treinta años antes que Kauffman publicara sus estudios, en una serie de artículos poco conocidos que éste con seguridad no leyó, y que permanecieron inéditos hasta 1968, catorce años después de su muerte, por considerárselos en su época un simple "trabajo de estudiante" (Turing 1969). En base a su modelo, probado en una época en que la tecnología de punta se basaba en tarjetas perforadas y lámparas incandescentes, Kauffman fue capaz de predecir el número de tipos de células en una especie a partir del número de genes que posee, considerando solamente el comportamiento de una RBA (Kauffman 1991; 1993; 1995).

La ventaja de las RBA sobre otras redes radica en su mayor versatilidad. Es importante señalar que las RBA han sido escogidas como uno de los formalismos que sirven de fundamentación teórica y experimental a pensadores en la órbita de la segunda cibernética. El otro gran formalismo favorito es, por supuesto, el de las redes neuronales, como luego se verá. El apóstol de esta línea de pensamiento en Francia ha sido el multifacético Henri Atlan, quien ha insistido (en base a una descripción que no es del todo exacta) en que esta clase de redes es capaz de modelar tanto el efecto de emergencia como la construcción de sentido (Atlan 1983).

En su forma mínima, estas redes se hallan formadas por elementos o autómatas conectados de forma tal que cada uno recibe entradas de sus vecinos, y como respuesta envía señales a otros. En los textos más recientes los autómatas son concebidos como "agentes", un término introducido por Douglas Hofstadter (1992: 364) en su metáfora del hormiguero, presentada en un genuino metálogo batesoniano. Mientras en los ACs las celdas se conectan con sus vecinas, en un RBA lo están con cualesquiera otras. Cada elemento sólo puede tener dos estados, y envía a los vecinos una señal de salida igual al estado en que se encuentra. La red funciona en paralelo y en forma discreta: en cada unidad de tiempo, todos los elementos cambian de estado al mismo tiempo según las reglas de cálculo características de cada uno de ellos. A partir de las señales binarias que recibe, cada autómata calcula su estado siguiente aplicando una función del álgebra de Boole que le es propia, de las 16 funciones que son posibles para dos variables, 14 de las cuales están distribuidas al azar entre los autómatas. Estas funciones no son otras que las funciones familiares del cálculo proposicional: FALSE, AND, A AND NOT B, A, NOT A AND B, B, XOR, OR, NOR, XNOR, NOT B, A OR NOT B, NOT A OR B, NAND y TRUE.

Comenzando por un estado inicial homogéneo, la red va oscilando en su conjunto hacia un estado final no homogéneo, con una estructura espacial y temporal particular, resultante de la evolución de la red hacia uno de sus atractores. En el proceso, la red se divide pronta-

mente en una porción que se muestra estable y otra sub-red que muestra oscilaciones periódicas. Las características de estabilidad de los atractores que se revelan finalmente son semejantes a las de otros formalismos con facultades de aprendizaje emergente. Entre las capacidades de las RBA se encuentra el reconocimiento y clasificación de formas, una tarea que no es susceptible de resolverse reductiva y analíticamente. Connatural a las RBA (y por derivación a gran parte de las teorías de la complejidad y el caos) es el concepto de atractor, que puede definirse como el conjunto de estados que se repiten periódicamente. Si dicho período es de un ciclo, se puede considerar fijo, y en tal caso se trata de un atractor de estado estable; si el ciclo es más amplio se habla en cambio de un atractor periódico. Un atractor, sumado a las trayectorias que llevan a él, define una cuenca de atracción.

En sus formas más complejas, las RBA tienen sus elementos conectados en un número de conexiones que se decide al azar. Una RBA de *N* nodos unidos por *K* conexiones por elemento se llama una red *NK*; un solo nodo puede recibir 2^k diferentes juegos de señales. Por ejemplo, cuando *K* es igual a 2, existen exactamente cuatro posibilidades: (0,0), (0,1), (1,0) y (1,1). Si la función para definir el próximo estado es la función booleana AND, el nodo mapeará la señal entrante de (1,1) al siguiente estado de 1, y todas las demás señales a 0.

Dependiendo de los valores de *K* las RBA se comportan distintamente definiendo tipos que coinciden con las tipologías de Chris Langton y Stephen Wolfram, y con la clasificación de Chomsky de los lenguajes formales y sus autómatas; los tipos se relacionan de maneras diferenciales con otras tantas formas de complejidad.

- Cuando *K* es 1, el comportamiento no es muy interesante; un conglomerado aislado de nodos puede formar un bucle de realimentación que casi siempre se bloquea en un estado fijo. Kauffman estima que este tipo es análogo al modelo político del stalinismo.
- En el otro extremo, para valores de *K* iguales a *N*, se manifiestan patrones inmensamente complicados, con ciclos periódicos tendientes al infinito; estas redes son extremadamente sensibles a las perturbaciones: alterando un solo bit en el estado de la red, los cambios se propagarán a su totalidad, razón por la cual estas redes son llamadas caóticas. Kauffman compara este tipo con los escenarios de desorden propios del comunismo a la italiana.
- Entre las dos regiones, con *K* igual a 2, orden y caos se balancean; las redes permanecen estables si se las perturba un poco, pero pueden verse empujadas a diferentes porciones del espacio de estados si la perturbación es mayor. Estas redes configuran, entre los tres tipos, los propiamente caóticos; no son ni puro desorden ni puro orden. En tanto sistemas complejos, poseen propiedades de las que los otros tipos carecen: auto-organización, robustez, adaptación y criticalidad auto-organizada. Se dice que son robustas porque desarrollan tendencia a converger hacia el mismo estado de ciclos (los mismos atractores) aún cuando las configuraciones iniciales difieran. La robustez se vincula con la propiedad que en teoría del caos veremos descripta como ergodicidad. Colectivamente, las redes *K*=2 desarrollarán un núcleo congelado de nodos inactivos e islas activas en toda su extensión. Otra característica que es su número de atractores es aproximadamente igual a la raíz cuadrada de *N*; con *N*=100.000, por ejemplo, se obtienen 317 atractores. En los seres humanos el número de genes es de unos 100.000, y el número de tipos de células conocidas es 256, una cifra que está en el mismo orden que la magnitud teórica. Este tipo es comparado por Kauffman con la auto-organización igualitaria.

A diferencia de los autómatas celulares comunes, las RBA no poseen una forma gráfica distintiva, dependiendo su aspecto de los estilos iconológicos de representación del programa de computadora que se trate. La imagen de la figura 3.13 muestra una RBA con una cuenca de atracción para una red N=13, K=3, tal como aparecería en DDLab de Andrew Wuensche, uno de los pocos programas clásicos de RBA (en arcaico DOS) que alguna vez estuvo disponible en las páginas del Instituto de Santa Fe.

Kauffman concibe su teoría de las redes booleanas como un complemento fundamental del evolucionismo darwiniano. Al principio de su carrera cuestionaba el concepto de selección natural, pensando que era más útil explicar los complejos patrones naturales en función de la emergencia del orden propia de la dinámica organizacional de la morfogénesis. Mientras los neo-darwinianos ortodoxos sostenían que, dentro de ciertos límites mecánicos, cualquier forma biológica es posible, Kauffman pensaba que dicha dinámica define un número limitado de puntos en el espacio de las posibilidades, y que el rango posible de las formas biológicas se encuentra restringido de una manera fundamental: existen más formas que las que pudiera explicar una estrategia exclusivamente adaptativa, pero no puede haber, por ejemplo, animales con ruedas, ya que el espacio de posibilidades morfológicas está poblado por atractores bien definidos. Kauffman todavía sigue buscando las claves de esa dinámica, pero después de discutirlo pormenorizadamente con John Maynard Smith, ahora también da cabida a la selección natural, alineándose con los especialistas de otras tecnologías emergentes, como John Holland, el creador del algoritmo genético (Lewin 1999: 40-42).

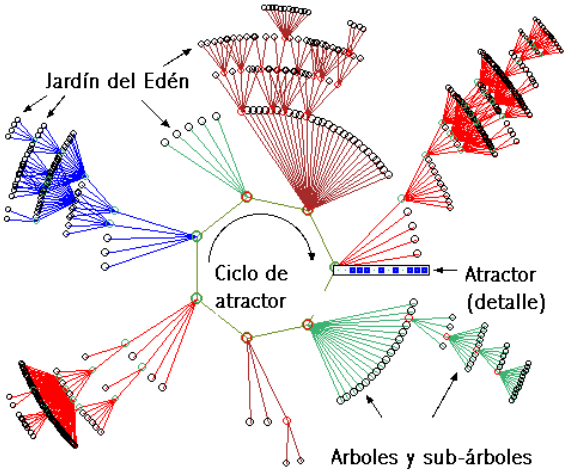


Fig. 3.13 – Redes booleanas aleatorias

La auto-organización de su modelo, aunque involucre agentes individuales, es ahora congruente con una concepción global de la evolución. Más todavía, la fórmula que sintetiza su pensamiento expresa que la complejidad es la suma de la auto-organización y la selección natural. Kauffman se opone así a la postura de ese conocimiento local que concibe toda realidad según el canon de un detallismo meticuloso. “Si tuviéramos que explicar el orden en biología mediante cantidades de *bits* selectivos, detallados e increíblemente improbables, y otras ad hocerías, si todo lo que hoy vemos fuese el resultado de una dura refriega en los orígenes, no estaríamos aquí. Sencillamente no habría suficiente mundo y tiempo para que la casualidad nos hubiese formado” (Waldrop 1992: 107).

Como modelo genético de la evolución (y a diferencia de otras concepciones densamente comunicativas), el esquema de Kauffman determina que el orden complejo surge de estruc-

turas levemente conectadas; una conexión más densa, con un *K* de orden más alto, no se asienta en ciclos suficientemente estables. Esta visión, además, se conecta con las elaboraciones de Warren McCulloch y Walter Pitts sobre redes neuronales, la neurofisiología de Donald Hebb, las investigaciones de Ross Ashby sobre diseño biológico y la teoría de la emergencia de John Holland; todos esos modelos ilustran, como hubiera querido Bateson, la identidad entre aprendizaje, auto-organización, diversidad y procesamiento de información, configurando el cuadro complejo de la lógica de lo viviente.

3.1.4 – RBA, agentes y sociedades artificiales en Antropología

La implementación de las RBA requiere comprender previamente su metodología. Esta es similar a la del procedimiento que se ha dado en llamar simulación de templado (*simulated annealing*), que a su vez se vincula con el conocido problema del vendejor ambulante que debe escoger la trayectoria más corta entre un número de sitios. En la generalidad de los casos el sentido común diría que hay que tratar de tomar cada vez el camino más corto; cuando se presenta esta alternativa siempre se la acepta. Pero a veces hay que aceptar tramos más largos entre las alternativas disponibles para minimizar la totalidad de la trayectoria. "Aumentar la temperatura" involucra aceptar un movimiento que incrementa el costo inmediato; "bajarla" equivale a disminuir la posibilidad de aceptar desplazamientos que podrían ir en la dirección equivocada. La aceptación del camino "caliente" cuesta arriba se dirime mediante el llamado criterio de Metropolis. La metáfora del templado, introducida por Kirkpatrick y otros (1983), se inspira en la forja de piezas de hierro, en la cual el herrero alterna calentamiento con enfriamiento lento para reorientar las moléculas y producir un metal más resistente, gracias a su acomodamiento en cuencas de valores locales mínimos.

El proceso sugerido por Kauffman (el método del parche) comparte un aire de familia con la simulación de templado. Para llevarlo a cabo hay que escoger primero una tarea difícil en la que muchas partes interactúan y dividirla en un *quilt* de parches contiguos. Luego hay que tratar de optimizar cada parche. Como los elementos de dos parches limítrofes están acoplados, encontrar una buena solución para un parche implica cambiar el problema que deben resolver los elementos de los parches adyacentes. El sistema comenzará a comportarse como un ecosistema co-evolutivo, en el que cada parche ocupa el lugar de una especie. Para evitar que el sistema se congele en un sistema evolutivo estable (SEE) de grandes parches o que se precipite en el llamado "caos de la Reina Roja" de miríadas de parches pequeños (análogo a la esquismogénesis opositiva de Bateson), hay que encontrar el tamaño óptimo y la mejor disposición de unidades. El tamaño estará probablemente muy próximo a la transición entre los regímenes caóticos y los ordenados, tal vez un poco más cerca del orden (Kauffman 1995: 245-271). Un ejemplo fácil de entender sería la elección del tamaño de sector óptimo para reorganizar una línea de montaje o una organización empresarial: primero se divide, luego se optimiza en el interior de cada sector, después la innovación se propaga a los agentes vecinos, y así se sigue. Como fuere, las implementaciones de RBA pueden considerarse como mundos de parches en interacción compleja.

Pese a que las RBA son de elevada generalidad y abstracción, he podido localizar numerosas aplicaciones recientes en ciencias sociales. Un trabajo de interés sociológico y antropológico es el de Jürgen Klüver y Jörn Schmidt (1999). Los autores introducen el concepto de geometría social, un principio que envuelve a los actores en un medio cultural cualquiera. Esta geometría define los tipos de interacciones que pueden tener lugar; no es por lo tanto

una geometría de espacios físicos, sino (siguiendo a Giddens y a Habermas) de espacios sociales tales como instituciones, organizaciones y redes, en tanto y en cuanto éstas se componen de reglas e interacciones. En esta geometría, la dinámica social resultante es específicamente humana. El modelo ha definido una topología y una métrica para el espacio social a través de la noción de adyacencia de los actores sociales. Los autores utilizan una representación de la misma basada en RBA o AC para los parámetros geométricos que pueden expresarse usando conceptos teóricos de grafos, tales como la densidad o las propiedades geodésicas. La geometría social mapea además contra lo que Kauffman llamó la estructura de cableado de los parches de RBA. El formalismo permite explorar la relación entre rangos de valores y complejidad social. Sus conclusiones se sintetizan en un "teorema de la desigualdad social", que expresa que un sistema social caracterizado por una regla cuyas propiedades produzcan desigualdad social generará sólo dinámicas simples; cuanto más se establezcan en el sistema propiedades de igualdad, más compleja será su dinámica (Klüver y Schmidt 1999). Las sociedades más complejas son más inestables, pero también más versátiles.

Klüver y Schmidt consideran que su modelo, capaz de expresar reglas de consecuencias eventualmente contraintuitivas pero que mapean sobre conceptos clásicos de la sociología y la antropología social, se comporta con más eficacia que las tradicionales formas analíticas de estas disciplinas, o que los modelos "de arriba hacia abajo" basados en cadenas de Markov o ecuaciones diferenciales, como los que instrumenta Joshua Epstein (1997). La misma idea expresan los antropólogos Michael Fischer y Dwight Read, quienes piensan que

> … los métodos analíticos tradicionales por sí solos no pueden afrontar (todavía) la complejidad que implica modelar agencia distribuida en los contextos materiales y simbólicos en que esa agencia se expresa. Pero incorporar la complejidad dentro de los modelos es necesario si queremos que el modelado trate las cuestiones que ocupan a la mayoría de los antropólogos, especialmente la conducta humana (Fischer y Read 1999).

La simulación multi-agente, de la cual los ACs y las RBA son la expresión formal primaria, proporciona un medio para hacerlo, porque posee el potencial para expresar el rango y diversidad de intereses que se encuentran en una sociedad real, teniendo en cuenta las propiedades emergentes que surgen de la interacción de los agentes. Klüver y Schmidt también argumentan que uno de los rasgos de la evolución social es un aumento de su dimensionalidad; las modernas sociedades, como las redes K=3, se pueden considerar tridimensionales, por cuanto están segmentadas verticalmente en familias, divididas horizontalmente en clases y diferenciadas funcionalmente en roles.

Un estudio antropológico sugestivo que aplica RBA a fenómenos de reciprocidad es el de Timothy Kohler (de la Universidad del Estado de Washington), Matthew Van Pelt y Lorene Yap sobre la cultura Pueblo prehispánica (Kohler, Van Pelt y Yap 1999). Partiendo de la base de que los intercambios recíprocos de bienes juegan un papel crítico en economías de pequeña escala, los autores recurren al concepto de reciprocidad balanceada, propuesto por Marshall Sahlins para designar esa clase de transacciones. Las comparaciones estadísticas que comprenden un alto número de sociedades, dicen, inducen a creer que la importancia de los intercambios recíprocos declinan a medida que crece el tamaño de la comunidad.

Sobre ese principio, los autores realizan una simulación con RBA asignando un valor de estado 1 a una celda que denota una unidad doméstica que entrega maíz (u hospitalidad, o trabajo) a las unidades vecinas, y 0 a las que no realizan esa entrega. Conforme a la notación

de Kauffman, el ciclo de estado 1 corresponde a no-intercambio, 2 a intercambio recíproco alternado con los dos vecinos, y 3 a intercambio permanente y simultáneo con ambos. El modelo, implementado en DDLab, sugiere un funcionamiento que satisface tanto la intuición antropológica como las premisas de Kauffman: la reciprocidad tiene más chances de resultar exitosa en sistemas en los cuales *N* es pequeño y *K* se encuentra en la región entre 2 y 3. Cuando *N* se incrementa sensiblemente, la forma de evitar un comportamiento caótico es aumentar el tamaño de las unidades de base para comprender no ya unidades domésticas sino clanes, sodalidades, mitades o comunidades.

Esto es consistente con lo que se sabe de los intercambios del ciclo Te de los Mae Enga, en los cuales las prestaciones se realizan a nivel de fratrías, clanes, subclanes o patrilinajes y no de los individuos. En tiempos históricos, es sabido que los Pueblo orientales despersonalizaron y tornaron más difuso su régimen de intercambios, aunque el precepto de reciprocidad siguió siendo importante. Los autores ensayaron luego otros mapeados semánticos de la conducta de las RBA con otras modalidades de mercado, inflexiones culturales y procesos históricos, encontrando que en general la herramienta permitía lograr una comprensión razonable de los distintos escenarios y que su trayectoria coincidía con el comportamiento de los casos arqueológicos y etnográficos conocidos.

En suma, en el modelo de Kohler, Van Pelt y Yap, una misma lógica emergente (que no es de ningún modo una concepción lineal) logra dar cuenta de gran parte de los casos registrados, encontrando pautas que conectan situaciones reales que a primera vista parecen inconmensurables. Llamo la atención sobre el hecho de que la dinámica compleja de estos algoritmos se aviene a ser elaborada en términos tan expresivos como los que propone un antropólogo renuente a la formalización como lo es Marshall Sahlins, aportando capacidades suplementarias suficientes para aclarar relaciones en diferentes escenarios históricos y culturales. Lo mismo que es más sencillo y compacto comprender la lógica del ajedrez en función de sus pocas reglas que del registro de partidas concretas, resulta más sensato comparar casos etnográficos cotejando las diversas reglas que los rigen, que confrontar las conductas divergentes de los casos en sí.

Otros estudios que se sirven de formalismos parecidos son los de Joshua Epstein y Robert Axtell (1996), que implementan ACs y mundos en grilla para realizar modelos de sociedades artificiales, en una vena similar a la de los experimentos en cultura sintética de Nicholas Gessler. Uno de esos ensayos puso a prueba y demostró la validez de la ley de Pareto de distribución de la riqueza conforme a la ley de potencia (*power law*) que explicaré en el capítulo sobre caos. En otro análisis, realizado en colaboración con investigadores de la Universidad de Arizona y el arqueólogo George Gumerman del Instituto de Santa Fe, se intentó formular una réplica de la historia de los Anasazi, una tribu que vivió en el sudoeste de Estados Unidos entre el siglo I y el XIV. El objetivo era generar una instancia de cultura artificial, situarla bajo las condiciones ambientales que experimentaron los Anasazi de carne y hueso, y en función de reglas muy simples examinar las alternativas de su evolución.

No se trataba, según Epstein, de un ejercicio meramente académico, sino de llegar a una explicación satisfactoria de la súbita desaparición de los Anasazi alrededor de 1350, un fenómeno que siempre ha desconcertado a los arqueólogos. Hasta el momento, los cambios ambientales y climáticos no han podido dar cuenta de las razones de ese colapso. Ahora se están introduciendo otros factores, en particuar formación de clanes, prácticas de herencia territorial e incluso canibalismo. Hay otros problemas a resolver, además: hay que explicar

por qué la introducción del maíz en la región hace tres mil años no tuvo impacto en la organización social, como tampoco lo tuvo la aparición de la cerámica a comienzos de la era cristiana; se debe encontrar el factor que hizo que surgieran cambios sociales importantes hacia el año 200, y los motivos que llevaron a que Chaco Canyon se constituyera en un centro regional mayor entre 900 y 1150, que colapsara dos siglos más tarde y que nunca recuperara su esplendor (Dean y otros 2000). Lo que allí se averigüe podría tener consecuencias operativas, pues los trabajos de Epstein y Axtell forman parte del gigantesco Project 2050, destinado a examinar perspectivas de desarrollo sustentable a escala global (Epstein y Axtell 1996: 164).

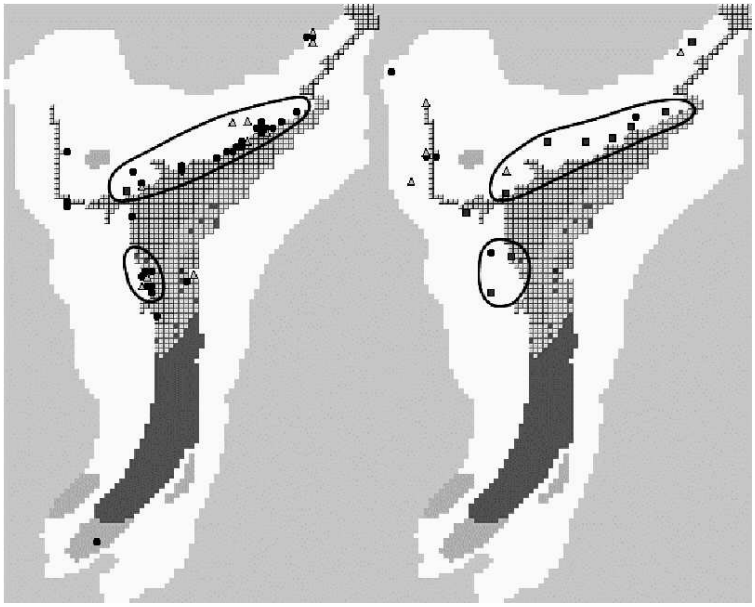


Fig. 3.14 – Cultura artificial Anasazi

La figura 3.14 muestra contrastes entre el mapa de asentamiento de la cultura Anasazi real hacia el año 1270 y su reconstrucción virtual en el trabajo de Gumerman, Swedlund, Dean y Epstein (2002). Las discrepancias entre ambos, aunque mínimas, señalan que las circunstancias climáticas y ecológicas no son suficientes para explicar los acontecimientos y que en la crisis debieron intervenir factores socioculturales cuya naturaleza resta todavía imaginar, modelar y someter a prueba. Para dar una idea de los factores que se tienen en cuenta en la implementación del modelo, mencionaré que la opción de "Anasazi artificial" en el programa AScape, por ejemplo, considera variables tales como edad máxima y mínima de fertilidad y muerte, necesidades nutricionales básicas, distancia y características del área de cosecha, cantidad de maíz cedido a los niños, tamaño de la unidad doméstica, distancia de las fuentes de agua y años de duración del acopio de alimentos, así como reglas de metabolismo, deceso, movimiento y fisión. Los gráficos ilustran la evolución de casas y granjas en distintas regiones, muertes por hambruna o abandonos de granjas. Conforme evoluciona el modelo, se pueden contrastar sus estados contra lo que se conoce del registro arqueológico.

Dada la vecindad del Instituto de Santa Fe y la evidente convergencia de todas las algorítmicas implicadas con las teorías de la complejidad y el caos, los Anasazi de Chaco Canyon se han convertido en la piedra de toque de los estudios del cambio en un esfuerzo transdisciplinario como pocas veces se ha visto (Lewin 1999: 1-22). Es tan importante deslindar los mecanismos de cambio de esa cultura como explicar la explosión repentina de diversi-

dad biológica del Cámbrico o las extinciones en masa del Pérmico, que afectaron al 96% de las especies. Los "puntos de bisagra" de los arqueólogos se están estudiando junto con (porque son lo mismo que) lo que los biólogos evolucionistas denominan puntuaciones, los físicos transiciones de fase de primero y segundo orden, los caólogos bifurcaciones, los topólogos catástrofes, los prigoginianos fluctuaciones críticas y los sistémicos morfogénesis (Fáth y Sarvary 2005a; 2005b). Apenas se ha comenzado a comprender las condiciones de lo que intuitivamente hemos llamado "cambio": esclarecer las propiedades de cualquiera de esas categorías arrojaría luz sobre todas las demás. Si algo revelan estos estudios, es que el concepto de "cambio" (del cual todo el mundo cree saber de qué se trata) esconde problemas harto más complejos e invita a soluciones más imaginativas de lo que el sentido común induciría a creer.

En esa misma tesitura se sitúan trabajos como los de Charlotte Hemelrijk (1999) y Carlos Gershenson (2001), que utilizan agentes autónomos adaptativos de tipo RBA para examinar la situación del individuo en sociedades igualitarias o despóticas; el de Cristiano Castelfranchi (1998) que implementa ténicas mixtas de inteligencia artificial para representar agentes racionales en su acción social; y el de Jim Doran y Mike Palmer (1995), que analiza en base al concepto de agencia el aumento de la complejidad social en el paleolítico tardío del suroeste de Francia. Todos los estudios que estoy nombrando difieren sustancialmente de las investigaciones de sistemas de las tres décadas anteriores, afectados de supuestos de conservación del equilibrio, como los estudios de Kent Flannery (1986) sobre los orígenes de la agricultura en Mesoamérica. Hoy no se habla tanto de sistemas a secas como de sistemas complejos, o de modelado basado en agentes (Bentley y Maschner 2003); ahora se tienen herramientas de implementación que se pueden manipular en público, mientras que antes todo lo que había era un discurso espinoso, tachonado de ecuaciones diferenciales que pocos podían interpretar y que ni aún las computadoras estaban en condiciones de resolver.

Particularmente exitosos han sido los estudios de Stephen Lansing y James Kremer (1993) de la Universidad de Arizona en Tucson sobre los intrincados sistemas de irrigación balineses, que han significado un enigma para hidrólogos y antropólogos durante décadas; según una encuesta realizada sobre quince grupos sociales distintos para evaluar la adecuación de los modelos, los "juegos" de sociedades hidráulicas programados por Lansing lograron capturar las ideas de los agricultores sobre cooperación y toma de decisiones en escenarios reales. A raíz de estos modelos se desató una polémica bastante feroz que aquí no viene al caso, a la que Lansing dio una respuesta ejemplar (Lansing 2000); como fuere, no todos los modelos antropológicos de simulación han sido así de afortunados ni mucho menos, pero se está sacando ventaja incluso de los eventuales fracasos, que cuando son estrepitosos son casi tan apetecibles como las demostraciones positivas. Dado que los modelos expresan en negro sobre blanco las ideas operantes, cuando fallan miserablemente son un buen indicador heurístico de la necesidad de reformularlas, contrariando al sentido común si es preciso (Dean y otros 2000: 180).

Estas investigaciones señalan una nueva tendencia en modelos de simulación basados en principios emergentes que ha definido una práctica transdisciplinaria consagrada a culturas, organizaciones y sociedades artificiales. El concepto de sociedades artificiales se origina en los trabajos de Carl Builder y Steve Bankes (1991), que a su vez se pueden considerar como una especie de ampliación sociológica de los modelos de vida artificial. Una sociedad artificial es, según Epstein y Axtell (1996) un modelo basado en agentes de un proceso social, tal

como comercio, migración, formación de grupos, guerra, interacción con el ambiente, transmisión de cultura, propagación de enfermedades o dinámica de población. Ya existe, por lo pronto, una publicación periódica especializada, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, editada en línea por la Universidad de Surrey en Inglaterra. En ella, el antropólogo Michael Agar ha pubicado recientemente estudios en los que aplica software de agentes (en particular StarLogo) a un modelo *emic* de consumo de drogas (Agar 2005).

Los modelos basados en agentes mejor conocidos son los del prolífico Robert Axelrod, muchos de los cuales encuadran en la clase de sociedades artificiales. Los trabajos de Axelrod que versan sobre la evolución de la cooperación (1984) y la complejidad de la cooperación (1997) se encuentran entre los más populares de toda la práctica. En cierto sentido se asemejan a los modelos de tipo CA de Sakoda o Schelling, aunque implementan reglas mucho más ricas y realistas. Particularmente expresivo es su modelo de diseminación de cultura, en el cual la cultura de un individuo se define como un conjunto de características *(features)*, tales como afiliación política o estilo de vestimenta; para cada característica hay un conjunto de rasgos (*traits*), que son los valores alternativos para aquélla, como militancia demócrata o color de ropa. El grado de similitud cultural es el porcentaje de rasgos compartidos entre diversos individuos. La idea básica es que individuos con características similares tenderán a interactuar y a la larga devendrán más parecidos entre sí, lo que puede interpretarse como influencia cultural. Aplicando estos principios, Axelrod demostró que los rasgos compartidos tienden a extenderse sobre regiones cada vez más amplias, hasta que limitan con regiones cuyos individuos no comparten esos rasgos. Un resultado aún más interesante es que el número de regiones culturales sobrevivientes es mucho mayor cuando hay muchas características con pocos rasgos que cuando hay pocas características con muchos rasgos cada una (Axelrod 1997). La figura 3.15 muestra un estado inicial con valores al azar para dos características con dos rasgos, y el estado del sistema al cabo de diez mil iteraciones. Otros estudios basados en agentes incorporan otras clases de variables.

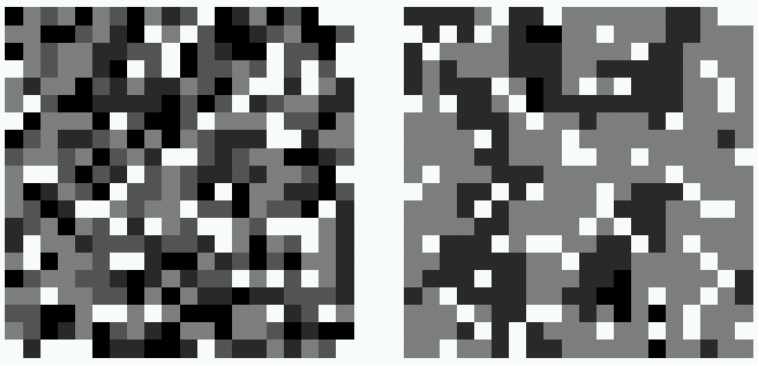


Fig. 3.15 – Propagación de culturas según Axelrod (1997)

Muchas de las herramientas de RBA, modelado basado en agentes y formalismos afines que se utilizan en estos estudios (como Sugarscape de Axtell y Epstein, EOS de Doran-Palmer, MANTA de Drogoul y Ferner, PolyWorld de Yeager o Echo de Holland) son análogos exactos de pasatiempos virtuales; a menudo, las versiones académicas son ediciones apenas modificadas de populares juegos de simulación. Los libros suelen venir acompañados de discos con los programas para que los lectores los apliquen a otros escenarios o examinen el rigor de las implementaciones. Algunas herramientas modeladoras basadas en agentes (AScape, EcoLab, Evo, Evolver, MadKit, NetLogo, Repast, StarLogo o Swarm) requieren co-

nocimiento de un lenguaje de programación orientado a objetos, aunque la puesta a prueba de un modelo ya programado se puede resolver por medios visuales y está al alcance de un usuario hábil. La investigación de este género demuestra ser también intensamente adictiva. Como decía Martin Gardner:

> Mi artículo de 1970 sobre el Juego de la Vida de Conway fue recibido con tanto entusiasmo por los aficionados al ordenador del mundo entero que la manía de explorar formas de vida se calcula que le ha costado al país millones de dólares en uso indebido de tiempo de ordenadores (citado por Regis 1987: 275).

Cuando Clifford Geertz (1996) instaba a los antropólogos a utilizar la metáfora del juego como arquetipo de proceso cultural no creo que estuviera pensando en nada semejante. El juego geertziano era sólo una figura del lenguaje propia de una analítica intuitiva, una lógica de lo concreto y una comprensión de lo particular; los juegos de agentes encarnan más bien búsquedas sintéticas, semánticas abstractas y alcances genéricos. Su función es ayudar a pensar, porque es evidente que el pensamiento no asistido, el lápiz y el papel no alcanzan para afrontar una complejidad cuyo espacio de fases suele ser más grande que lo que alcanza a concebir la imaginación. Ahora se comprende mejor por qué el conocimiento local (o cualquier otro método discursivo) nunca podrá ir más allá de la reseña exterior de partidas de juego o acontecimientos individuales. Los MBAs, con sus hormiguitas y sus premios en azúcar, tienen sin duda cierto toque de estupidez, como si la vida real les quedara grande; pero, en el proceso de su tratamiento, uno se ve forzado a reflexionar sobre las implicancias desbordantes de cualquier enunciado sobre un mundo cultural regido por principios de no linealidad.

El contraste entre las visiones convencionales y las artificiales es entonces extremo. La ciencia de los sistemas complejos impulsa el concepto de sociedad artificial con un nombre insolente y en términos de algo que apenas difiere de un juego (Johnson 2001). Como tampoco se sabe muy bien qué es lo que significan sus patrones y atractores, o qué clases de relaciones aún más problemáticas faltan descubrir entre los diversos tipos de comportamiento, el estudioso no tiene otra salida que interrogar reflexivamente a su herramienta, cuestionar todo el tiempo su alcance y su validez, examinar la posibilidad de construir un instrumento mejor ¿No era eso lo que se proponía Bateson en *Naven*?

Plantear los procesos como juegos, tratar de deslindar sus reglas, enfatizar las interrelaciones entre agentes, abre una caja de Pandora. La artificiosidad de los autómatas y los modelos de agentes es innegable y su modelo de proceso y representación sólo cubre una parte pequeña de los escenarios empíricos; pero su uso invita a preguntarse si existen a fin de cuentas las herramientas "naturales" para el estudio de los fenómenos de la cultura, o si más bien la exploración que parece más natural es sólo la que se nos ha inoculado como costumbre, o la que mejor encubre las dificultades implicadas.

Los sistemas complejos son apenas el comienzo de una búsqueda cuyo desenlace no está a la vuelta de la esquina, un proyecto de cuyo éxito tampoco existe la menor garantía. Al antropólogo le toca decidir si permanece confiando en que sus interpretaciones están a la altura de la complejidad cultural, o si afronta cara a cara las consecuencias de sus propias metáforas y las inevitables disonancias de sus herramientas. El cambio propuesto es radical. Es de prever que esta situación provoque, en un futuro próximo, el enfrentamiento de entusiastas y detractores, apocalípticos e integrados, conversos y guardianes del orden.

3.2 – Redes neuronales

3.2.1 – El paradigma conexionista de Inteligencia Artificial

> Ningún sistema es como el cerebro – Todos los sistemas son como el cerebro – Como usted desee.
>
> ROSS ASHBY, *Notebook*

Esta sección será relativamente breve, pues a pesar de la importancia del asunto y de la frecuencia con que en las ciencias de la complejidad se utilizan modelos conexionistas, las redes neuronales mismas (con algunas excepciones que después se señalarán) no son dispositivos complejos de carácter sistémico, sino modelos definidamente estadísticos: cajas inicialmente negras que, se quiera o no, materializan primero la idea conductista de la *tabula rasa* y luego el aprendizaje emergente, asociando patrones de entrada con patrones de salida o, según señalara el pionero Donald Hebb (1960), estímulos con respuestas.

En el proyecto de diseñar máquinas con alguna capacidad de inteligencia más allá del cálculo numérico que se ha llamado primero Inteligencia Artificial (IA) y luego ciencia cognitiva, han existido históricamente dos opciones posibles:

1) El modelo mecánico, también llamado el "programa fuerte" de la IA o "modelo del sistema de símbolos físicos", ligado en un principio al MIT. Su nombre afectuoso es GOFAI (*Good Old Fashioned Artificial Intelligence*); el despectivo, gracias a Daniel Dennett, "computacionismo de la Alta Iglesia". Consiste en una representación del conocimiento en términos de hechos y reglas, expresados usualmente en un lenguaje de programación lógica. Un lenguaje característico es Prolog, el cual implementa cálculo de predicados de primer orden de manera declarativa, mediante cláusulas de Horn; otro es LISP, un procesador de listas recursivas de tipo funcional. Los ejemplares más reputados y exitosos de este paradigma son los resolvedores de teoremas y los sistemas expertos, ampliamente utilizados en diagnosis y clasificación. Estos modelos pueden operar sólo en aquellos dominios en los que es posible una representación analítica del conocimiento (Reynoso 1993: 228-267).

2) El modelo estadístico, llamado conexionista y basado en redes neuronales o "computación natural". En vez de representar el conocimiento, esta perspectiva desarrolla un análogo computacional del cerebro, constituido por neuronas ligadas por sinapsis, a cada una de las cuales se le asignan valores o "pesos" que varían durante el proceso de aprendizaje. Estos modelos sirven para sintetizar formas de conocimiento no susceptibles de reglarse analíticamente, como la percepción de patrones (firmas autógrafas, formas contra un fondo), que poseen cualidades variables o gestálticas. No existe ninguna correspondencia analógica entre el estado de una red neuronal y el carácter semántico de la capacidad adquirida. Las máquinas neuronales son sintéticas, no analíticas; son estrictamente *modelos asociativos estadísticos* cuya destreza cardinal es la generalización probabilística (Zeidenberg 1990: 17); adquieren una capacidad y proporcionan un resultado, pero no constituyen explicaciones de la realidad modelada.

Los modelos conexionistas surgieron en la época de la primera cibernética y en estrecha relación con ella; fueron bautizados de ese modo cuarenta años más tarde por Jerome Feldman y Dana Ballard (1982). Warren McCulloch estuvo presente en las reuniones de la fundación Macy de 1946 en la que se trataron problemas de inhibición del sistema nervioso. Poco después comenzó a participar Walter Pitts, de quien Wiener recuerda que desde temprano se interesó por las matemáticas de la información e introdujo, novedosamente, el em-

pleo del tiempo como parámetro (Wiener 1985: 35). En 1943 Pitts se había incorporado al equipo del MIT que formalizó la fundación de la cibernética (p. 37). El grupo cibernético sostenía que, para que las computadoras inteligentes fueran viables, se debía implementar "un análogo exacto" entre sus componentes y las sinapsis neuronales; también se sabía que era necesario establecer una codificación binaria, y todos estaban persuadidos de que "el problema de la percepción de la Gestalt, o de la formación perceptual de universales, giraría en torno a estas premisas" (p. 42). En 1947 el grupo elaboró un aparato para que los ciegos pudieran leer texto impreso, lo cual es claramente un problema gestáltico (p. 59), dado que las variables de escala, tipografía y ruido circundante no se pueden reglar de antemano para todos los casos que se presenten. Hacia 1950 se desarrollaron las máquinas de Hebb, aplicando una concepción de la organización neuronal que correspondía a las ideas del neurólogo Ramón y Cajal. Era un modelo distribuido con peculiaridades hologramáticas que exhibía la propiedad de ser tolerante a errores, incertidumbre o destrucción parcial. Por la misma época, Albert Uttley propuso sus redes neuronales adaptativas, que poseían una bien definida capacidad asociativa, útil para realizar tareas de clasificación. En 1951 Marvin Minsky (quien en la narrativa autopoiética pasa por ser un rústico que nunca entendió bien el conexionismo) desarrolló SNARC, la primera red neuronal verdadera jamás construida.

En 1962 Frank Rosenblatt diseñó sus perceptrones, redes neuronales dispuestas en dos conjuntos de unidades (sensoriales y motoras) sometidas a procesos de aprendizaje de claro tono conductista, a través de un simple nivel de neuronas de McCulloch-Pitts. Inicialmente se asignaba a los contactos o sinapsis valores numéricos arbitrarios; cuando la red suministraba una respuesta correcta a un estímulo, no se hacía ningún ajuste; si era incorrecta, se aumentaban los pesos si la sinapsis debía estar activada pero no lo estaba, o se los disminuía en el caso contrario. Se pudo demostrar que al cabo de un número reducido de presentaciones de patrones de estímulo-respuesta, los pesos convergían a un conjunto de valores que representaban la clasificación o computación que se quería alcanzar. Si bien ganaron buena reputación como mecanismos de reconocimiento de patrones, la implacable crítica que Minsky y Papert (1969) hicieron de los perceptrones en dos capas ocasionó el descrédito de todo el programa conexionista temprano y, según se cree, empujó a Rosenblatt al suicidio. Entre otras observaciones formales que todavía se mantienen, y utilizando como marco de referencia la teoría de grupos, Minsky y Papert señalaron que los perceptrones no podían resolver problemas que requirieran recursividad o que fueran no-lineales, como distinguir entre una "T" y una "C" rotadas, diferenciar un número par de otro impar, o resolver operaciones booleanas que incluyeran XOR (Pollack 1988; Graubard 1993; Freeman y Skapura 1991: 28).

Más tarde, sin embargo, el programa conexionista resolvió algunos de esos problemas con redes neuronales de capas múltiples, añadiendo unidades ocultas entre la entrada y la salida que permiten articular mejor el funcionamiento de la red y "evocar" conocimiento antes que buscar información. Tales son, por ejemplo, las redes de Hopfield y en particular las máquinas de Boltzmann, en las cuales se pueden implementar ricos procesos de aprendizaje que quedan registrados en una memoria estable. Este proceso se origina en el trabajo de Ross Ashby, quien había acuñado el concepto de ultraestabilidad para describir la forma en que el cerebro tiende a configuraciones dinámicamente estables. Luego Rumelhart y McClelland introdujeron sus famosas redes de múltiples capas y métodos de cambio de peso proporcionales a las diferencias entre el patrón de activación deseado y la excitación total de la unidad, resolviendo así el dilema de la asignación de crédito a las unidades ocultas. A partir

de estas máquinas más refinadas se dejó de hablar de perceptrones y se comenzó a definir el paradigma como redes de procesamiento distribuido en paralelo (PDP), neo-conexionismo o redes conexionistas, sin más. La figura 3.16 muestra una de esas redes con alimentación hacia adelante de tres capas: una matriz de entrada de 5x7 unidades, una capa oculta de 10 y una capa de salida de 26; se trata de un sistema clasificador apto para el reconocimiento de letras mayúsculas, representado en el momento de tratar una "M", discernible en la coloración de los pixels. Se pueden observar los valores de probabilidad asignados a las diversas unidades de salida, la binarización matricial de la letra en la capa de entrada y el alto valor de probabilidad asignado en la capa de salida a "N", el caracter más semejante.

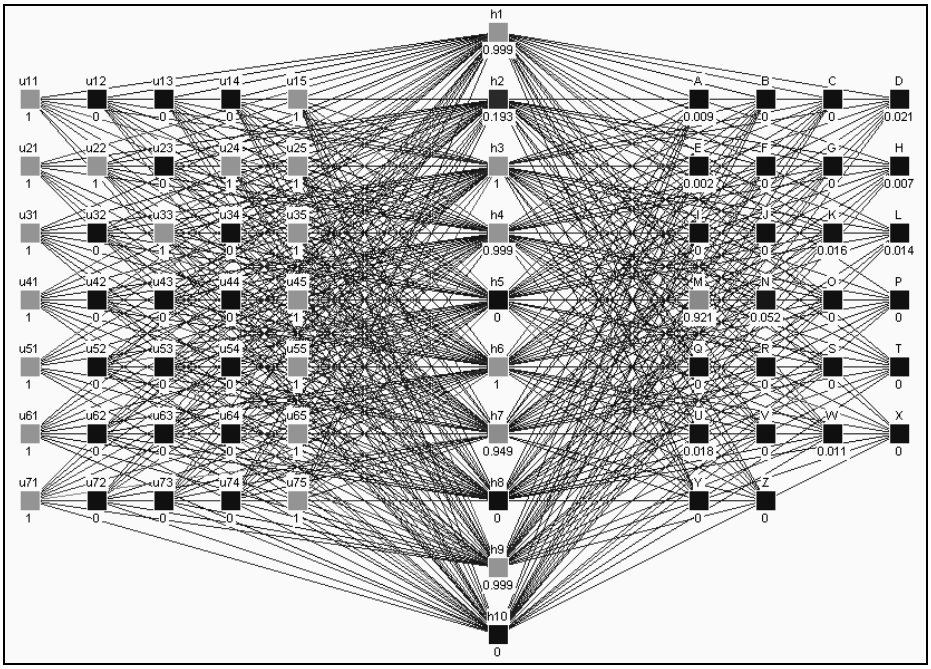


Fig. 3.16 – Red neuronal de tres capas

Paralelamente a la multiplicación de las capas se fueron inventando métodos de aprendizaje asistidos por humanos o no, que existen hoy en una inacabable galería de tipos. Sin ánimo de ser sistemático y para dar una idea de la vastedad del campo mencionaré el algoritmo de propagación hacia atrás (en variantes como QuickProp, Rprop, con caída de peso, BPTT), la retropercolación, la contrapropagación, el aprendizaje hebbiano, la cuantización de vectores de aprendizaje dinámico, las técnicas de compresión no lineal, la correlación en cascada (estándar, podada o recurrente), el análisis de componente principal, la regla Delta de McClelland-Rumelhart, el método de Levenberg-Marquardt, la demora temporal (TDNN), el método de descenso más brusco, el algoritmo de Gauss-Newton, el método de aproximación expandida de rango (ERA), el aprendizaje competitivo, el aprendizaje bayesiano, el mapa auto-organizado de Kohonen (SOM), el método de refuerzo, la minimización estocástica, la simulación de templado y, como si fuera poco, el algoritmo genético. Nótese que todas las metodologías implican densas combinaciones arquitectónicas, funcionales, heurísticas y algorítmicas.

Al lado de los métodos de entrenamiento hay también una colección de técnicas de podado (*prunning*) que se usan para reducir espacios de búsqueda y costos de tiempo, almacenamiento y tamaño. Se suelen podar nodos, pesos, insumos y unidades ocultas. Las técnicas más comunes incluyen algoritmos de términos de penalidad y algoritmos de sensitividad

que alternan aprendizaje y podado. Estos últimos reciben nombres tales como podado basado en la magnitud, daño cerebral óptimo, cirujano cerebral óptimo, esqueletonización y eliminación de las unidades no-contribuyentes. También hay técnicas varias para evaluar la actividad de las capas ocultas: análisis de conglomerado, diagramas de Hinton, espacios de estado multidimensionales, dominios de frecuencia, etc.

Existe una diversidad exorbitante de tipos de redes neuronales. Algunas, como las llamadas máquinas de (Teuvo) Kohonen, sirven para fines específicos, tales como reconocimiento de patrones. Otras, como las redes de múltiples capas con alimentación hacia adelante, pueden utilizarse para propósitos más generales. Mezclando deliberadamente clases genéricas y tipos específicos aquí sólo enumeraré los perceptrones y adalines, los neocognitrones de Fukushima, las redes de Hamming, los perceptrones en múltiples capas, las redes de Marr, las redes de resonancia adaptativa (ART, ART I, ART II), las redes recurrentes (en las variantes de Jordan, Elman, Hopfield, Boltzmann…), las redes de función de base radial (RBF), las redes auto-organizantes (Kohonen, componente principal, redes crecientes de Fritzke, de memoria auto-asociativa), las redes totalmente recurrentes, las máquinas de vectores de soporte, los mapas generativos topográficos de Bishop-Spencer-Williams y las redes amo-esclavo. Algunas topologías admiten algoritmos específicos y algunas arquitecturas combinan diversas topologías. Dado que el tema sólo débilmente está ligado a las teorías de la complejidad no entraré en detalles de las infinitas clases. El lector puede consultar los textos de Matthew Zeidenberg (1990), James Freeman y David Skapura (1991), Jack Cowan y David Sharp (1993) o Stan Franklin (1997), bajo advertencia de que apenas sirven para empezar.

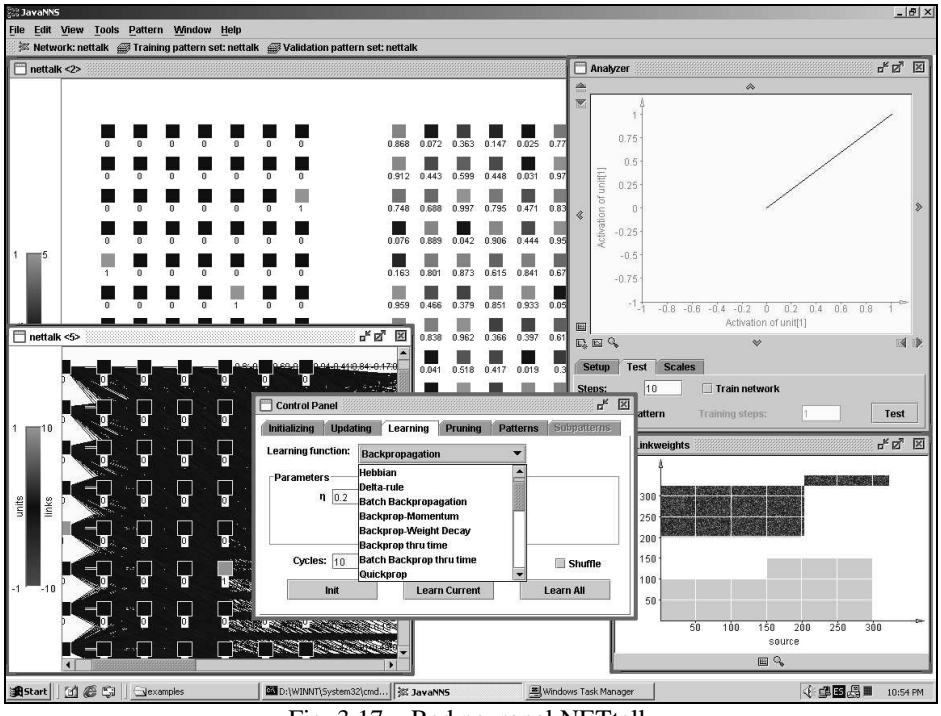


Fig. 3.17 – Red neuronal NETtalk

En materia de software, sugiero a quienes busquen una herramienta de modelado probar NeuroSolutions. Otra opción es JavaNNS, un programa basado en SNNS de la Universidad de Tübingen que articula 12 tipos de red y 23 modelos de aprendizaje. La figura 3.17 muestra una instantánea de ese programa ejecutando en mi máquina una sesión con NETtalk; es-

ta es una red clásica propuesta por Terrence Sejnowski y Charles Rosenberg, capaz de leer textos en inglés en voz alta luego de un breve entrenamiento con propagación hacia atrás.

Con el correr del tiempo la pureza del modelo conexionista (si es que alguna vez existió) se fue relajando y se introdujeron metodologías y arquitecturas con grados variables de representación y simbolismo. Debido a las simplificaciones de la literatura de divulgación y a que el territorio de la IA se presentó alguna vez como una contienda entre héroes y villanos, se ha generado una confusión que es preciso despejar. Antes se hablaba de "conexionismo" a secas, pero el movimiento está atomizado en tecnologías divergentes y escindido en epistemologías distintas. Según Steven Pinker y Alan Prince (1988: 2-3) estas son:

1) Conexionismo eliminativo. Se trata de la forma más pura y radical. Promueve redes neuronales más o menos literalmente ligadas a una contrapartida del cerebro (y eventualmente también del cerebelo o el hipocampo) en las que no se implementa ninguna clase de semántica o nivel simbólico. Afirma que los símbolos, las variables y la manipulación de primitivas lógicas no corresponden a nada que ocurra o se encuentre en el cerebro o en la mente. Meramente mapea vectores de entrada contra vectores de salida, sobre la base de un algoritmo de corrección de errores, tal como la propagación hacia atrás. Es sustentada por filósofos como Georges Rey, por heideggerianos como Varela, Winograd o Flores, tal vez por Daniel Dennett, y algo más cerca de la computación real por Jeff Elman, para quien habría efectivamente representación en el conexionismo, pero de carácter no simbólico y sensible al contexto (Marcus 1998).

2) Conexionismo implementacional. En esta modalidad, la organización de las redes es una representación, pero de más bajo nivel (o más abstracta) que el nivel simbólico. Sostiene que la mente es una red neuronal, pero también un procesador de símbolos a un nivel más elevado. Procura entonces que sea la propia red la que implemente la manipulación. A veces se lo llama conexionismo sub-simbólico, aunque nadie ha explicado bien qué es eso (Pagels 1991: 138). El autor más representativo es Paul Smolensky, quien promueve dos niveles: una especificación algorítmica de los mecanismos de procesamiento y una representación semántica que guarda alguna analogía con el análisis componencial de la antigua antropología cognitiva (Reynoso 1986b; Touretzky y Hinton 1985).

3) Conexionismo revisionista de procesamiento de símbolos. Es una forma híbrida, intermedia entre las dos anteriores, una de las cuales ya era híbrida. Los símbolos a procesar no serían los hechos y reglas simbólicos usuales, sino otros más abstractos emanados del plano neuronal: funciones de umbral, niveles de activación de pesos, campos magnéticos, etc. La mayoría de la llamada Escuela de San Diego de Rumelhart y McClelland (ex-PDP) integra esta variante. Es quizá la modalidad mayoritaria, y a pesar de los rumores que se han echado a rodar, está "fuertemente comprometida al estudio de la representación interna y el proceso" (Rumelhart y McClelland 1986: 121).

Aunque ellas no integran formalmente el conjunto de los formalismos emanados desde el interior de la ciencia de la complejidad, hoy en día las redes neuronales se utilizan como uno de los componentes optativos del trabajo experimental en esa ciencia, casi siempre en combinación con otras herramientas, tales como lógica difusa, modelos de programación basados en agentes o algoritmos darwinianos (Pagels 1991; Holland 1995). Poco a poco el campo ha ido creciendo, al mismo tiempo que se convirtió en una actividad de nicho, capaz de proporcionar servicios puntuales a proyectos de investigación de distinta naturaleza. Muy pocos en él han oído hablar de segunda cibernética, estructuras disipativas, autopoiesis, enacción, sistemas observadores, ciencias de la complejidad, caos o fractales. Sostengo entonces que es desatinado afirmar que "las ideas autoorganizativas en física y en matemática no lineal" (Varela 1990: 55) derivadas de Prigogine y von Foerster hayan tenido algo

que ver con el resurgimiento del conexionismo; en toda la literatura técnica y en los algoritmos y topologías revisados no hay el menor rastro de semejantes ideas.

La intención que me ha animado hasta aquí es la de mostrar hasta qué punto la presentación de un conexionismo monolítico por parte de las facciones inclinadas a la autopoiesis y el constructivismo no está a la altura de la complejidad de los problemas y la naturaleza de los acontecimientos (véase Varela 1990; Devlin 1997; Cilliers 1998). No hay un conexionismo singular que tenga un único significado epistemológico. Algunas redes son modelos corticales que se saben burdos y abstractos; otras, las más, son dispositivos lógicos o de ingeniería que meramente funcionan como se espera. Después de Hopfield, a nadie le importa si son modelos del cerebro o no (Hertz y otros 1991: xv). Sólo unos pocos tipos manifiestan conductas emergentes o auto-organizadas genuinas; la inmensa mayoría combina puertas lógicas mecánicas con métodos estadísticos, como la interpolación de curvas, que se solían emplear para hacer frente a datos incompletos o ambiguos (Zeidenberg 1990: 18). Las redes no son modelos de subjetividad o de experiencia humana: son sólo programas que reconocen, asocian, correlacionan, generalizan.

No existe aún una clasificación aceptable de las topologías y los métodos de entrenamiento en uso, y los *surveys* existentes son más bien ilegibles para los científicos sociales. La situación del paradigma es además claramente transicional. Se han conocido unos cuantos éxitos y otras tantas frustraciones. Se ha logrado que las redes neuronales puedan leer textos confusos o manuscritos, entender lenguaje hablado y traducirlo eficientemente, pintar cuadros figurativos o abstractos, conducir automóviles en carreteras abarrotadas, clasificar objetos en las clases que se quieran y muchas cosas más; pero ninguna de ellas es capaz todavía de hacer todo eso junto en un tiempo aceptable, a un costo sensato y "naturalmente". De ningún modo se puede esperar tampoco que alguien que no esté familiarizado con sus fundamentos matemáticos logre manejarlas con maestría en unos pocos meses.

El complejo espacio conexionista no se presta, en fin, a tratamientos axiológicos de conjunto. La narrativa dicotómica construida por filósofos y periodistas ya no es ni convincente ni operativa; salvo algún fundamentalista de la vieja escuela, ningún estudioso deja de hacer su trabajo porque el *input* del entrenamiento no pueda evitar referencias de carácter simbólico, semántico o informacional. La puesta en ridículo de los sistemas simbólicos ha agotado sus municiones y el campo ha progresado mucho más por el refinamiento algorítmico y la refactorización del código que por la prédica de unos cuantos ideólogos. Ya nadie cree en serio que se pueda simular la conciencia, o que las máquinas donde corren los programas neuronales sean inteligentes en sentido estricto, o que vayan a desplazar al hombre pasado mañana (Horgan 2001; Russell y Norvig 2003: 1081, 1097). No conviene ser simplista en este terreno, pues no hay tecnología más complicada sobre la faz de la tierra. A diferencia de lo que sucede con otros formalismos, los resultados suelen ser aquí, conceptualmente, órdenes de magnitud más simples que lo que hay que saber para producirlos.

3.2.2 – Redes neuronales en Antropología

Las redes neuronales se han utilizado hasta ahora con más provecho en arqueología que en antropología sociocultural. Uno de los estudiosos que está en la vanguardia de la teoría y práctica conexionista en arqueología es Juan Barceló, de la Universidad de Barcelona. Aunque reconoce que la computación neuronal tal vez no sea la herramienta de procesamiento de datos más popular en la disciplina, Barceló considera que el conexionismo puede im-

pactar en al menos tres áreas de investigación: el procesamiento de imágenes, la simulación y la interpretación. Tras revisar la literatura existente, que incluye algunos trabajos de Paul Gibson sobre datación e interpretación de arqueofauna, otros de Suzanne Bell y Richard Jantz sobre clasificación de restos esqueletales y una docena de aplicaciones diversas, Barceló sugiere que los estudios más adecuados a la tecnología podrían ser los de análisis cerámico y de microdesgaste, los modelos de información geográfica y la clasificación automática de artefactos a partir de fotografías (Barceló 2005). En esta última línea, precisamente, miembros de los equipos de trabajo que he dirigido para el CONICET y la Universidad de Buenos Aires han elaborado modelos conexionistas para el reconocimiento y clasificación de motivos en arte rupestre, utilizando mapas auto-organizantes de Kohonen (Castro y Díaz 2002). Los programas correspondientes aún se encuentran en fase de desarrollo. Todos los materiales producidos por estos equipos en redes neuronales, algoritmo genético, modelos de simulación, sistemas expertos, dinámica no lineal y sistemas de información geográficos se encuentran en línea en http://www.anthropokaos.com.

En antropología sociocultural, las redes neuronales se han utilizado muy pocas veces como herramienta útil, y el uso no ha sido particularmente descollante. Todas las investigaciones que conozco han implementado redes subsimbólicas, microcognitivas o representacionales, antes que modelos más puros, de modo que en la práctica no existe una diferencia categórica entre los modelos antropológicos conexionistas y los que se sirven de formalismos de representación del conocimiento como los *schemata*, los *frames*, los *scripts*, las redes semánticas o los grafos conceptuales (D'Andrade 1995; Reynoso 1998: 11-106). Por añadidura, casi todos los modelados hechos por antropólogos "inspirados por el conexionismo" consisten en círculos y vectores dibujados en un papel (p. ej. Strauss y Quinn 1997: 60); que esas plantillas funcionen o no en una red neuronal verdadera dependería del binario y las topologías que se escojan y de unas cuantas docenas de funciones y valores de parámetro. Huelga decir que en un contexto tan delicado dichos diagramas no califican como experimentos aceptables, ni justifican las ironías anti-GOFAI que surgieron al calor de su elaboración.

A diferencia de lo que ha sucedido en otras áreas de la ciencia compleja (la aplicación de geometría fractal a los patrones urbanos, el uso de modelos de agentes para investigar el cambio cultural, los estudios de redes sociales independientes de escala, las implementaciones del algoritmo cultural para optimizaciones computacionales), en el caso del conexionismo meramente se aplicó tecnología más o menos experimental a problemas disciplinarios de la antropología, sin que el tratamiento empírico involucrara un progreso, significara una prueba crítica o mejorara la comprensión de las posibilidades de los formalismos en las ciencias duras. Poco tiene que ver todo esto, empero, con los problemas de la complejidad organizada o los nuevos paradigmas teóricos: el estudio detenido de estas experiencias sería relevante en un texto de antropología cognitiva, pero no aportaría mayores elementos de juicio en este lugar.

3.3 – El Algoritmo Genético y otras técnicas evolutivas

Evolución = Caos + Feedback

JOSEPH FORD

3.3.1 – La teoría de la evolución como heurística algorítmica

Ni duda cabe que la evolución biológica, aunque más no sea por su extensión de milenios y los millones de variantes que se han dado en el repertorio de la diversidad de las especies y en la abigarrada estructura de sus códigos genéticos, es un asunto que tiene que ver más con la complejidad y la dinámica que con la estática y las ideas simples. También es una problemática que ha generado teorías y conceptos que, más allá de los tecnicismos de sus detalles, forman un marco más inteligible y expresivo para el lector humanista que casi cualquier otro discurso lógico o formal. Entre nosotros hay quienes ignoran qué es una ecuación diferencial o un difeomorfismo, pero todos creemos saber qué es una especie o qué es adaptación.

El algoritmo genético (AG) debería ser familiar para los antropólogos no sólo porque instrumenta con transparencia y simplicidad una metáfora evolutiva como modelo conceptual y como programa de computación (sea manual o en una máquina), sino porque, recuperando los pensamientos más valiosos de las diversas teorías de la complejidad, otorga razón conceptual, fundamentación matemática y una masa crítica de experiencias empíricas a las intuiciones de Gregory Bateson que establecían, en una visión monista como las que ya casi no existen, la unidad y la identidad absoluta del procesamiento de información, la mente, el aprendizaje y la lógica de lo viviente. Incidentalmente, cabe recordar que el padre de Gregory, William Bateson, acuñó la palabra "genética" en 1908, así como la terminología relativa a los alelos y el propio concepto de mutación, y que Gregory fue bautizado con ese nombre en homenaje a Gregor Mendel (Bateson 1991: 193, 195).

En informática igual que en biología y genética, el llamado enfoque neo-darwiniano establece una misma definición de la adaptación:

Adaptación = Variación + Herencia + Selección

Dado que los organismos vivientes son consumados resolvedores de problemas –argumenta John Holland (1992a: 44)– los computadores científicos trataron de realizar algoritmos de eficiencia semejante a la de los mecanismos naturales desde fines de la década de 1950. Los primeros intentos se comportaron pobremente, dado que se atenían a las metáforas propias de la época; por aquel entonces se intentaba resolver el problema de la generación de nuevas combinaciones de genes a través de la mutación y no del apareamiento. A principios de los 60 Hans Bremermann, de la Universidad de California en Berkeley agregó un principio de apareamiento (*mating*): las características de la descendencia se determinaban mediante la suma de los genes de los dos progenitores. Este procedimiento resultó limitado, sin embargo, porque sólo se podía aplicar a características susceptibles de ser sumadas.

En esa década se hablaba más bien de *programación evolutiva* (PE) o evolución simulada, una idea introducida por Lawrence Fogel (Fogel, Owens y Walsh 1966). La diferencia entre esta forma de programación y el AG es que aquélla tiende a usar representaciones más concretas de los ejemplares, en lugar de las cadenas de caracteres (*strings*) que habrían de ser

propias del algoritmo ulterior. La PE, por otra parte, no utilizaba como heurísticas los conceptos y operaciones genéticas, y lo que vendría a hacer las veces de mutación operaba según complejas perturbaciones gaussianas multivariadas, en lugar de simple conmutación de un rasgo. En ese modelo, las transiciones se especificaban como autómatas de estado finito. La propuesta de la PE fue ásperamente rechazada por la comunidad de inteligencia artificial de aquel entonces, lo que incidió en la aceptación (un tanto renuente al principio) de las propuestas genéticas que vendrían después.

Una técnica similar es la que se ha llamado *estrategia evolutiva*, concebida en 1963 por Ingo Rechenberg y Hans-Paul Schwefel, a quienes luego se unió Peter Bienert de la Universidad Técnica de Berlín. La EE se inscribe todavía dentro de los modelos expresamente ligados a la cibernética, en la concepción tradicional de Wiener. Como novedad, implementa una forma de recombinación ausente en la PE. La representación utilizada es un vector de longitud fija con números reales, en el que cada posición corresponde a un rasgo del individuo. Estos rasgos representan conductas, en vez de estructuras. El procedimiento de evaluación considera entonces interacciones arbitrarias y no lineales entre rasgos, lo cual comporta una estrategia más holística que la que es propia de otros algoritmos. El operador principal es una mutación gaussiana, en la cual se agrega al vector de cada individuo un valor de una distribución gaussiana para crear un nuevo ejemplar; otro operador utilizado con alguna frecuencia es el que se ha llamado recombinación intermedia, en el cual se promedian los vectores de los progenitores. En algunas ocasiones no se utiliza un criterio de adecuación, sino que la gestación se efectúa escogiendo progenitores al azar o implementando un método alternativo (Rechenberg 1973).

En espíritu, PE y EE son a su vez muy parecidas a una técnica bien conocida, la simulación de templado (*simulated annealing*), que se basa en búsquedas al azar y que ya he discutido a propósito de las RBA (Davis 1987). Una tercera corriente, más nueva y de creciente popularidad, es la de la *programación genética*, promovida por John Koza (1992), que utiliza fragmentos de programas (por lo común rutinas en lenguaje Lisp) como unidades de representación e intercambio, en vez de secuencias de caracteres. En un programa genético el esquema de representación se basa en árboles de complejidad variable que contienen funciones y valores. Cada hoja de cada árbol es un rótulo tomado de un conjunto de valores, y cada nodo es otro rótulo tomado de un repertorio de funciones. Cada árbol, a su vez, corresponde a una función singular que debe ser evaluada; las hojas se evalúan conforme a su valor y las funciones se evalúan tomando como argumento las funciones de las ramas dependientes. La operación de *crossover* se realiza intercambiando sub-árboles entre dos progenitores. El lector puede poner a prueba la PG mediante el Estudio de Programación Genética, un programa creado por Andrés de Campo Novales, investigador de la Universidad de Córdoba (España).

Una cuarta variedad de formalismo evolutivo es la *memética*, que recientemente se ha modelado en computadoras y que adhiere a una especie de darwinismo universal. Si bien se han sumado al movimiento figuras intelectuales de primer orden, como Daniel Dennett y Gary Cziko, la corporación antropológica se ha opuesto a la corriente. Ésta remonta sus orígenes a la polémica definición de meme en el libro *El gen egoísta* del etólogo Richard Dawkins, sindicado como uno de los promotores de la sociobiología (aunque no lo haya sido en sentido estricto). Hay varias analogías entre la memética y el algoritmo genético; Dennett afirma, por ejemplo, que la "peligrosa idea" propuesta por Darwin es en rigor un

algoritmo abstracto, a menudo llamado "dinámica de replicador". Esta dinámica consiste en operaciones de selección iteradas antre replicadores que mutan al azar de acuerdo con algún criterio. Los replicadores, a su vez, son unidades de información que poseen la capacidad de reproducirse utilizando recursos de algún sustrato material. En esos términos, el proceso es obviamente genérico; cuando se ejecuta sobre material biológico como el ADN esta dinámica no es otra que la selección natural. La unidad de tratamiento de la memética es naturalmente el meme, y cualquier item de memoria, cualquier entidad que se propague culturalmente a lo largo del tiempo podría serlo: las cuatro primeras notas de la Quinta Sinfonía de Beethoven (pero no las primeras tres), el logotipo de Coca-Cola, "melodías, ideas, consignas, modas de vestimenta, formas de hacer vasijas o de construir arcos" (Dawkins 1985: 286). La idea de Dawkins es que la cultura evoluciona, que todo que lo que evoluciona tiene que tener capacidad de reproducirse y que la unidad de reproducción por antonomasia es el gen, o sus equivalentes replicadores en otros órdenes, o sea los memes.

El AG se diferencia de la memética en varios respectos. Por empezar, el AG nada dice acerca de cómo evoluciona la cultura, o cuáles son sus unidades de cambio, o sus mecanismos de replicación; simplemente aplica un algoritmo abstracto, explotando las capacidades de transmisión de información en el tiempo y computación que le son propios. Incluso el formalismo difiere: en la memética no hay ni *crossover*, ni apareamiento; sólo mutación al azar. Algunos antropólogos que practican modelado complejo, como Robert Reynolds, implementan ambas ideas indistintamente. Pero nuestros profesionales más inclinados a la teorización y más sensibles a los matices teóricos, se han inclinado a criticar a la memética y no lo han hecho precisamente con blandura.

El antropólogo francés Dan Sperber (director de investigaciones de la CNRS), aún admitiendo la similitud y el linaje darwiniano común que comparten la memética y su propia epidemiología de las representaciones, cuestiona a aquélla aduciendo que las unidades de la cultura no son memes, pues no poseen el mecanismo interno de replicación requerido; en todo caso, las unidades se reproducen pero no se "copian" (Sperber 1996: 101-108; 2000). Maurice Bloch, por su lado, deplora que la memética ignore por completo a la antropología, que ha estado desarrollando ideas en torno de la evolución cultural mucho más refinadamente durante décadas; afirma que los memes, además, carecen de caracteres distintivos y que su status ontológico es incomprensible (Bloch 2000). Adam Kuper, finalmente, cuestiona al movimiento sobre bases semejantes, señalando además que la cultura tampoco "existe" en un sentido significativo que justifique imaginarla operando de esa manera (Kuper 2000).

Pero más allá de la programación evolutiva, la estrategia evolutiva, la programación genética y la memética, el modelo más simple y elegante es el del algoritmo genético propiamente dicho. Ya en la década de 1960, John Holland (alumno de Norbert Wiener) y sus colegas y estudiantes de la Universidad de Michigan en Ann Arbor habían estado investigando análisis matemáticos de la adaptación, y se convencieron de que la recombinación de grupos de genes por medio del apareamiento constituía una parte crítica de la evolución; desarrollaron entonces el AG, que incorpora tanto apareamiento como mutación (Holland 1992a; 1992b).

El AG, llamado originariamente *plan adaptativo*, es la base de los sistemas clasificadores. La definición más simple de AG es tal vez la de David Goldberg:

> Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de la selección natural y la selección genética. Combinan supervivencia del más apto entre estructuras

de caracteres con un intercambio de información estructurado pero azaroso para formar un algoritmo de búsqueda que tiene un cierto sabor de búsqueda humana. En cada generación se forma un nuevo conjunto de criaturas artificiales (*strings*) utilizando unidades y piezas de las más exitosas (*fittest*) de entre las criaturas viejas. Pese a que son aleatorios, los algoritmos genéticos no son simples caminos al azar. Explotan eficientemente la información histórica para especular sobre nuevos puntos de búsqueda en los que se pueda encontrar mejor rendimiento (Goldberg 1989: 1).

Cualquier programa de computación en un lenguaje imperativo o funcional estándar (C, C#, Java, Lisp, Visual Basic) puede ser re-escrito como AG. Para desarrollar el tratamiento de un problema particular, uno simplemente comienza con una población de cadenas de ceros y unos al azar, y luego evalúa cada cadena de acuerdo con la calidad de su resultado. De acuerdo con el problema que se trate, la medida de su adecuación (*fitness*) puede ser rentabilidad económica, resultado deportivo, tamaño, belleza o lo que fuere. Las cadenas de más alta calidad se aparean; las de baja calidad perecen. A medida que se sucedan las generaciones, las cadenas asociadas con soluciones mejoradas prevalecerán. El universo de todas las cadenas puede verse como un paisaje imaginario; los valles marcan la ubicación de cadenas que codifican soluciones pobres, y los puntos más elevados corresponden a las mejores cadenas posibles.

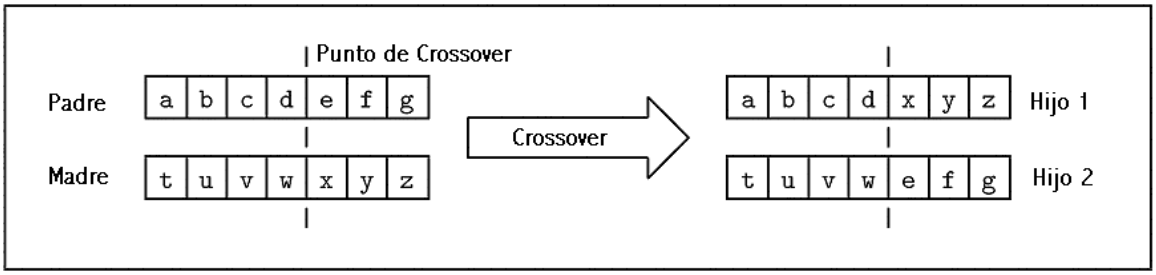


Fig. 3.18 – Crossover

En la ejecución del AG, lo primero es localizar las regiones del espacio de búsqueda que tienen las mejores cadenas, lo que suele hacerse usando tácticas auxiliares, pues dicho espacio suele ser muy grande. Una vez que se localizan las mejores soluciones en el espacio de búsqueda, las de mejor performance se aparean. Para ello se alinean dos cadenas, se selecciona un punto en la cadena y las posiciones a la izquierda de ese punto se intercambian para producir dos salidas: una que contiene los símbolos de la primera cadena hasta el punto de *crossover* y los de la segunda a partir de ese punto, y la otra conteniendo la cruza complementaria. Las crías (*offspring*) no reemplazan a los progenitores, sino a cadenas de baja performance, de modo que la población permanece siempre constante. En ocasiones el punto de *crossover* se elige al azar, o la chance de reproducción se otorga proporcionalmente a la adecuación de los ejemplares (Mitchell 1999: 9).

El proceso de ejecución del AG varía de un modelo o una implementación a otra, pero en su forma canónica involucra los siguientes pasos:

(1) Inicializar una población de cromosomas

(2) Evaluar cada cromosoma en la población

(3) Crear nuevos cromosomas apareando cromosomas existentes

(4) Aplicar mutación y *crossover* mientras los progenitores se aparean

(5) Eliminar miembros de la población para dejar lugar a los nuevos cromosomas

(6) Evaluar los nuevos cromosomas e insertarlos en la población

(7) Si se ha terminado el proceso, detenerse y obtener el mejor cromosoma; si no, ir a 3

Es importante destacar que el AG es extrapolable a diversas clases de aplicaciones porque su espacio de búsqueda define una representación sintáctica de la solución, y no una solución en sí misma. Por ejemplo, un AG que trate de encontrar el número más alto entre 0 y 7 (obviamente 7) ignora qué son los números naturales, y ni siquiera sabe qué número es mayor o menor que otro. Solamente pregunta al evaluador cuál es, digamos, el puntaje de éxito para un individuo cuyo genotipo es "101"; el fenotipo, "5" en este caso, no tiene incidencia sobre la forma en que el AG actúa sobre los genes. Además de ser ciegos y de no requerir información auxiliar, los AG son polimodales: diversas soluciones alternativas en diversas regiones del espacio de búsqueda, aunque genotípicamente distintas, pueden tener valores parecidos de adecuación.

En la formulación original de Holland las mutaciones sólo afectan a un porcentaje muy bajo de cadenas; uno de cada diez mil símbolos cambia cada tanto de cero a uno o viceversa, afectando a cualquier ejemplar. Una mutación no necesariamente avanza hacia el hallazgo de una solución, pero proporciona salvaguarda contra el desarrollo de una población uniforme incapaz de evolución ulterior (Holland 1992a: 46). Las mutaciones evitan además la convergencia prematura hacia (y el estancamiento alrededor de) mínimos locales, pero los especialistas en AG han sido conservadores respecto de la implementación de mutaciones, ya que en general ellas son más molestas que optimizadoras, lo mismo que en la vida real. Demasiadas mutaciones convertirían el AG en un método de tipo Montecarlo. Apropiadamente, se cree que la mutación es ventajosa, pero no más que secundaria en la corriente evolutiva (Koza 1992). Esta observación desmiente de cuajo la idea de Gregory Bateson, Henri Atlan, Heinz von Foerster y Edgar Morin de que el ruido, el acontecimiento y el accidente son "la única fuente posible de nuevos modelos" y el único motor sistémico de cambio (Morin 1984: 155-156). A pesar de la difundida creencia, la mutación (el azar, el error) no es ni por asomo el agente primordial de la diversidad. Por el contrario, las funciones de recombinación y dominancia han demostrado ser factores de innovación mucho más poderosos (Goldberg 1989: 14; Holland 1992b: 97, 111).

Un aspecto interesante de la teoría de AG son los sistemas clasificadores, que son modelos genéticos del aprendizaje. Un sistema clasificador agrega al AG una serie de reglas, cada una de las cuales ejecuta acciones particulares cada vez que una pieza de información satisface las condiciones que se han establecido. Las condiciones y acciones se representan mediante secuencias de bits correspondientes a la presencia (1) o ausencia (0) de características específicas en la posición apropiada. Como lo ilustra Holland, una regla clasificadora que reconozca perros puede ser codificada como una cadena (*string*) que contenga unos para los bits correspondientes a "peludo", "babea", "ladra", "leal" y "busca palos", y ceros para los bits que denotan "metálico", "habla Urdu" y "posee tarjeta de crédito" (Holland 1992a: 44). El ejemplo es, como puede verse, complacientemente pedagógico; de manera más realista, el programador debería elegir las características más primitivas de modo que puedan ser combinadas (como en el juego de las veinte preguntas) para clasificar la mayor cantidad de objetos y situaciones. Los sistemas clasificadores tienen considerable interés para la ciencia cognitiva, debido a la eficiencia de los mecanismos competitivos y a sus capacidades de descubrimiento en entornos cambiantes, pero no desarrollaré el tema en este contexto. Tampoco se tratarán los sistemas adaptativos complejos propuestos por Holland,

de los cuales el más conocido es Echo, un "experimento de *Gedanken*" más que un modelo de simulación, que combina tecnología de agentes con computación paralela, estrategias de anticipación y algoritmo genético (Holland 1992b: 186-198).

Con el correr de los años y el recambio de paradigmas la correspondencia entre las ideas de genética natural y artificial se ha tornado cada vez más estrecha: los especialistas consideran ahora que las cadenas de caracteres o dígitos de los sistemas artificiales son análogas a los cromosomas. En la naturaleza, la dotación total de cromosomas se llama genotipo; en AG, el paquete total de cada cadena se denomina estructura. En sistemas naturales, el organismo formado por la interacción de la dotación genética con su ambiente se llama fenotipo; en los artificiales, las estructuras se decodifican para formar un conjunto de parámetros, solución alternativa o punto (en el espacio de soluciones). Así como los cromosomas se componen de genes que pueden tomar valores llamados alelos, las cadenas se componen de rasgos o detectores, que toman diferentes valores en diferentes posiciones de la cadena. La correspondencia entre ambas series nomenclatorias se expone en la tabla 3.2, tomada de Goldberg (1989: 22).

Natural	Artificial
Cromosoma	Cadena (*string*)
Gene	Rasgo, caracter o detector
Alelo	Valor del rasgo
Locus	Posición en la cadena
Genotipo	Estructura
Fenotipo	Conjunto de parámetros, solución alternativa, estructura decodificada
Epistasis	No-linealidad

Tabla 3.2 – Correspondencias entre naturaleza y modelo

Gary Flake (1999: 346-347) proporciona un ejemplo dramático de la eficiencia del AG para evolucionar convergiendo hacia la frase "furious green ideas sweat profusely", que constituye una cadena de 35 caracteres, inspirada en un ejemplo célebre del lingüista Noam Chomsky. El número de cadenas posibles de 35 caracteres con un alfabeto de 27 letras es un más que astronómico 27^{35}, o sea:

125.236.737.537.878.753.441.860.054.533.045.969.266.612.127.846.243

Generación	Adecuación promedio	Mejor adecuación	Mejor string
0	0.035314	0.200000	"pjrmrubynrksxiidwctxfodkodjjzfunpk "
1	0.070000	0.257143	"pjrmrubynrksxiidnybvswcqo piisyexdt"
:	:	:	:
25	0.708686	0.771429	"qurmous gresn idnasvsweqt prifuseky"
26	0.724286	0.800000	"qurmous green idnasvsweqt prifuseky"
:	:	:	:
36	0.806514	0.914286	"uurious green idnas sweqt profusely"
37	0.820857	0.914286	"qurmous green idnas sweqt profusely"
:	:	:	:
41	0.895943	0.942857	"uurious green idnas sweat profusely"
42	0.908457	0.971429	"qurious green ideas sweat profusely"
:	:	:	:
45	0.927714	0.971429	"qurious green ideas sweat profusely"
46	0.936800	1.000000	"furious green ideas sweat profusely"

Que ese número pueda escribirse en un renglón no debe llamar a engaño: la edad del universo se calcula en una cifra mucho menor de segundos, alrededor de 10^{17}. El exponente no variará mucho entre que yo escribo este libro y usted lo lee. Aún cuando una máquina produzca un número abismal de soluciones por unidad de tiempo (supongamos, 300 millones por segundo) no alcanzaría la edad del universo para encontrar todas las cadenas posibles, algunas de las cuales coincidan con esa frase. Con una población de 500 cadenas al azar, un *crossover* de 75% y una tasa de mutación de 1%, Flake necesitó sólo 46 generaciones, insumiendo unos minutos de ejecución en una computadora modesta. El algoritmo no sirve sólo para adivinar frases; aquí la frase ocupa el lugar de un criterio de evaluación que podría ser diferente, complejo, difuso, probabilístico o de valor diferencial para cada posición. El algoritmo tampoco "sabe" hacia donde debe converger, ni posee criterios de optimización explícitos. Y sin embargo triunfa. Esa eficiencia del principio genético desmiente de una vez por todas que la naturaleza no haya tenido tiempo de construir sus complejísimas estructuras en función de la selección natural. La vida se abre paso, y lo hace con rapidez (Holland 1998: 230-231). La figura 3.19 ilustra el diagrama de flujo de la versión clásica del algoritmo.

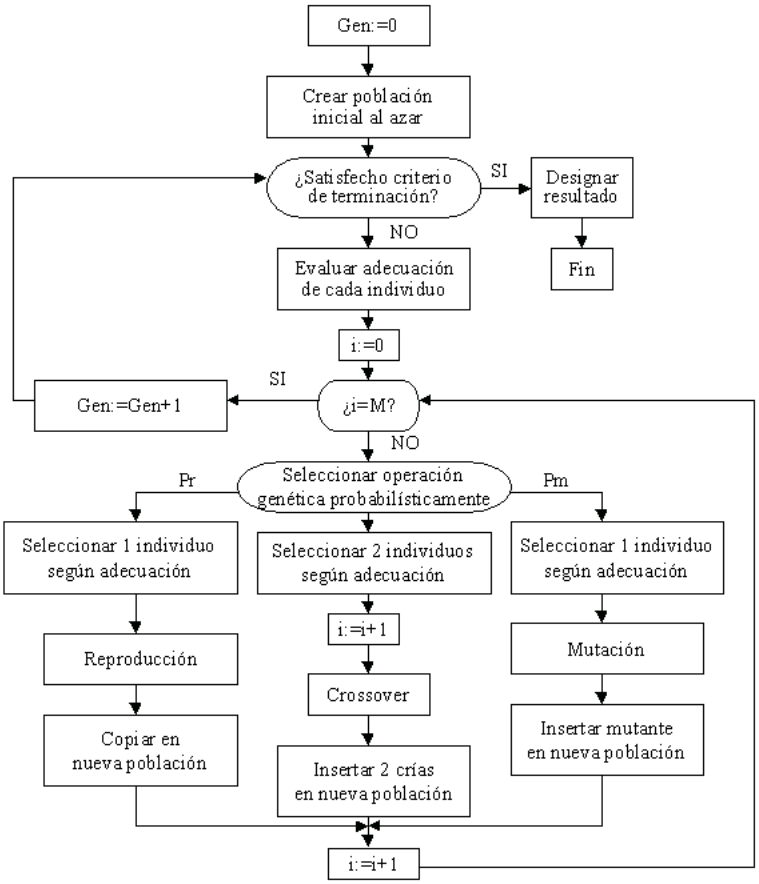


Fig. 3.19 – Diagrama de flujo del algoritmo original

La eficiencia del AG en comparación con otros procedimientos de búsqueda y resolución de problemas se basa en el hecho de que las regiones de más alto rendimiento (*payoff*) tienen más descendencia en las generaciones siguientes. Maximizar la adecuación equivale a minimizar la función de costo. De hecho, el número de cadenas en una región determinada

se incrementa de manera proporcional a la estimación estadística de la adecuación de esa región. Un estadístico necesitaría examinar docenas de muestras de miles o millones de regiones para estimar la adecuación promedio de cada región; el AG se las ingenia para alcanzar los mismos resultados con muchas menos cadenas y virtualmente sin computación.

Aunque el modelo subyacente a la estrategia del AG es el de la genética, antes que el de la emulación del funcionamiento de la mente humana (como en algunas corrientes de la inteligencia artificial), se ha querido ver en el azar controlado del proceso de *crossover* un equivalente funcional de las capacidades humanas de creatividad e innovación (Goldberg 1989: 17). Algo de eso hay. Por lo pronto, algunos autores han utilizado el algoritmo para crear formas musicales y patrones artísticos, usando como criterio de adecuación su evaluación estética por parte de sujetos experimentales o su aceptación por redes conexionistas (Pazos y otros 1999; Manaris y otros 2003). Nada hay en este intento de inhumano u ofensivo para la gloria del arte, sino sólo una consecuencia del hecho concreto de que las innovaciones culturales (que el algoritmo ha de emular con razonable exhaustividad en el espacio de las combinaciones y las alternativas) deben ser aceptadas por los miembros de una sociedad si es que han de perpetuarse. El AG no estipula que los cambios culturales surjan de una mutación; él sólo emula la emergencia de una novedad a partir de un antecedente y de una dinámica abstracta: la pragmática del modelo puede imitar a la naturaleza, como en el caso de Holland, o a la cultura, como en el algoritmo de Reynolds que después describiré.

Esta experiencia colateral en el uso de AGs indica además que la semántica de los caracteres contemplados en el fenotipo y de los criterios de adecuación se puede hacer tan delicada como se quiera. De hecho, los modelos evolutivos excesivamente ligados a la biología, como el juego adaptativo de John Daniel Bagley, la simulaciones biológicas de células de R. S. Rosenberg y de Roger Weinberg, o la búsqueda adaptativa con evolución simulada de Daniel Cavicchio no lograron trascender su esfera disciplinaria ni alcanzar el campo de las teorías genéricas de la complejidad (Goldberg 1989: 89-102). El AG lo logró, pues es menos un modelo biológico que un meta-modelo de propósito general.

Pero así como en las redes neuronales se manifestaban conductas de "cansancio" o "fastidio" (que obligaban a implementar soluciones de "gratificación" y "descanso"), en el ámbito de los AGs también se han presentado comportamientos emergentes que remiten a analogías de la vida natural. El trabajo realizado por los programadores genéticos sugiere que los algoritmos son capaces de conductas sugestivamente complicadas, como el planeamiento anticipado, la inducción o el aprendizaje latente, un fenómeno análogo al de una rata que no encuentra recompensa en la exploración de un laberinto y se torna por ello capaz de hallarla mucho más rápidamente, tanto más cuanto más hambre tiene. Estas habilidades no son algo que deba programarse de antemano, sino un genuino emergente de factores de tiempo y variedad. En este sentido, Holland sugiere que los mundos simulados del algoritmo genético exhiben contrapartidas y equivalentes a fenómenos como simbiosis, parasitismo, enfrentamientos, escaladas, imitación, formación de nichos, especiación y especialización (Holland 1992a: 50). Conceptos importantes en la tecnología de AG son los de esquemas (para representar relaciones complejas entre genotipos y fenotipos), epistasis (interacciones no lineales entre genes), exploración (visita de regiones no conocidas en el espacio de búsqueda), estrategia de coma (reemplazo de los padres por los descendientes) y estrategia plus (los descendientes compiten con los progenitores). Otra metáfora común en el campo de los AGs es la de elitismo, que es como se llama a la decisión de no someter a mutación las soluciones

que están mejor encaminadas (Haupt y Haupt 2004: 43). Tenemos aquí entonces un repertorio de metáforas, de ideas expresivas y de métodos que está esperando que alguien se atreva a explorarlo más a fondo en las investigaciones que le dicte su imaginación.

3.3.2 – Aplicaciones de algoritmos genéticos en Antropología

El AG y la extensa familia de técnicas emparentadas han demostrado su robustez y viabilidad en docenas de aplicaciones científicas diferentes. Aunque se acostumbra combinarlos con otras técnicas (heurísticas lógicas, redes neuronales, programación orientada a objetos) y aunque su esfera de uso es menos genérica que la de otros formalismos que ya hemos revisado, es evidente que el algoritmo llegó para quedarse. Hoy en día el diseño de dispositivos complejos (como las turbinas de los jets de Boeing u otros dilemas de enorme espacio de búsqueda) suele hacerse con procedimientos genéticos, dado que pocas de las otras formas de solución son suficientemente eficaces cuando hay tantísimas variables involucradas. Siendo la realidad tan pródiga en discontinuidades, multimodalidad, ruidos y factores para los que no existen ni siquiera conceptos, los métodos tradicionales suelen fracasar allí donde el AG triunfa casi por rutina, a fuerza de oportunismo y simplicidad.

Al antropólogo que le cause escozor la idea de la supervivencia de las soluciones más aptas, o el criterio de adecuación, o que piense que el proceso interno de evolución cultural es diferente al que se da en la naturaleza, se le puede responder que en realidad no es imperativo tomar esas metáforas al pie de la letra; alcanza con que el algoritmo sea capaz de emular un cambio que en todo caso es un emergente no lineal de un proceso. En un modelo abstracto no hay nada que obligatoriamente signifique algo. Las unidades sintácticas pueden ser interpretadas como ideas, memes, genes, rasgos estilísticos, argumentaciones, propiedades, valores de variable, modas, unidades ergológicas, componentes epistémicos, cualidades estéticas o cualquier otra *cosa* ; la dinámica replicativa se puede expresar en términos de azar, evolución, creatividad, imaginación, innovación, adopción, copia, mímesis, ejercicio del libre albedrío o cualquier otro *proceso*; y el criterio de adecuación se puede entender como logro del éxito, eficiencia, persuación, carisma, placer, interés, popularidad, belleza, corrección, pregnancia o cualquier otra *pauta*. Lo único que hay que aceptar es que cuando se trata de cambio, la vida no es un mal patrón de referencia después de todo, habida cuenta de la diversidad existente. Brian Goodwin (1998: 74-75) ha demostrado asimismo que no hay nada especialmente biológico en la idea de selección natural: no es más que un término usado por los biólogos para describir el modo en que una forma es reemplazada por otra; se la podría llamar estabilización dinámica, o emergencia de los estados estables en un sistema.

El planteo de un problema mediante AG difiere sustancialmente de la aproximación que se considera más "natural" en ciencias sociales, la cual sigue ligada a modelos de tipo mecánico o estadístico y a procesos ancestrales de deducción e inducción. Epistemológicamente, los AG ayudan a reflexionar sobre el significado, las condiciones, la categorización y la metodología de la formulación de problemas y, por supuesto, a comprobar si en un planteo determinado existe una convergencia razonable hacia una solución. En ciencias sociales se ha tornado habitual, asimismo, combinar AG con otras tecnologías complejas, sobre todo autómatas celulares y redes neuronales; con estos recursos, por ejemplo, se ha podido modelar la evolución de la comunicación en mundos estocásticamente imperfectos, en escenarios de conocimiento incompleto o bajo diversas condiciones de variabilidad ambiental (Grim, Kokalis, Alai-Tafti y Kilb 2000).

Al establecerse numerosos congresos regulares de algoritmos genéticos o programación evolutiva, así como publicaciones periódicas especializadas, en los últimos años se han multiplicado las experiencias empíricas con esta clase de modelos emergentistas. La antropología viene avanzando a un paso mucho más reposado que el de otras disciplinas humanas, como la economía o la sociología, pero aún así existen unos cuantos ejemplos de uso en la literatura reciente.

En etnohistoria, Robert G. Reynolds, doctorado en la Universidad de Michigan en Ann Arbor (donde sin duda estudió con Roy Rappaport), abordó mediante técnicas de AG los modelos de conducta y procesos de toma de decisiones de cazadores-recolectores prehistóricos, así como los orígenes de la agricultura en el valle de Oaxaca (Reynolds 1979; 1986). Reynolds conoce los AG de primera mano. En esas investigaciones originales, que lo convirtieron en el máximo referente de los AG en antropología, trabajó bajo la tutoría compartida de Kent Flannery (uno de los pioneros del marco cibernético-sistémico en ecología cultural) y del padre mismo de esta algorítmica, John Holland.

Posteriormente Reynolds elaboró un voluminoso conjunto de trabajos relativos a lo que él llama "algoritmos culturales" combinando AG con otras técnicas: lógica difusa, redes semánticas, organizaciones multi-agentes e incluso memética. Los ha definido como modelos computacionales de la evolución cultural. Los componentes de un algoritmo cultural consisten en un espacio de creencias y un espacio de población. Los componentes interactúan a través de un protocolo de comunicaciones y en algún punto se replican en el tiempo implementando criterios de herencia duales, que expresan tanto variables de población como de conocimiento. El modelo permite una estructuración jerárquica en ambos espacios, así como la implementación de diferentes ritmos de evolución biológica y cultural, pues es convicción de Reynolds que "la cultura evoluciona diez veces más rápido que el componente biológico". El dominio del conocimiento está asimismo separado de la representación de los individuos, lo cual facilita el tratamiento del "conocimiento ontológico"; éste se encuentra formado por los conceptos compartidos a propósito de un dominio, constituyendo un análogo de lo que Roy Rappaport llamaba el "entorno cognitivo".

Los programas de Reynolds soportan estrategias híbridas y flexibles de resolución de problemas; su *framework* mixto permite expresar casi todos los modelos conceptuales existentes relativos al cambio cultural y explorar otros nuevos. En gran medida, el carácter heterogéneo de los algoritmos culturales responde al hecho de que el conocimiento, como todo antropólogo cognitivo bien sabe, se manifiesta de distintas maneras e impone que se razone sobre él de diferentes formas. La resolución de problemas requiere múltiples poblaciones y espacios de creencia interactuando entre sí. Reynolds aplicó esos modelos a diversos temas, incluyendo *data-mining* arqueológico, evolución organizacional, cooperación, orígenes del lenguaje (en co-autoría con Robert Whallon), rituales de intercambio de llamas en los andes peruanos (con Joyce Marcus), transmisión de rasgos culturales, el ritmo de cambio cultural comparado con el biológico, etc.

El número de monografías que Reynolds presentó en congresos o publicó en revistas especializadas es abrumador, como también lo es la escala de esas conferencias y ediciones. Reynolds ha desarrollado formalismos específicos al lado de reflexiones sobre los problemas conceptuales implicados en la adopción de modelos complejos emergentes a nuestra disciplina. Arbitrariamente, para establecer un corte, he incluido en la bibliografía sólo sus artículos sin coautor publicados en libros que he leído, omitiendo el resto; la idea es que el

especialista en los mismos temas, culturas, regiones geográficas o algoritmos se vaya haciendo una idea de los variados usos del AG en la disciplina (Reynolds 1994a; 1994b; 1997; 1999a; 1999b). El algoritmo cultural no es una simple extrapolación desde las ciencias duras a las blandas, sino un modelo formal que explota ingeniosamente metáforas originadas en el funcionamiento de la cultura y la sociedad para orientar la arquitectura de soluciones de software. Aunque pocos antropólogos estén en condiciones de comprender los áridos reportes de investigación de Reynolds, este algoritmo constituye acaso el único aporte de origen antropológico que ha ganado un sitial entre las metaheurísticas evolutivas que hoy se utilizan en ciencias de la computación y en optimización de diseños de ingeniería (Ray y Liew 2003; Haupt y Haupt 2004).

Un elaborado proyecto de Bill Sellers (2001) demuestra el uso de los AGs como herramienta puntual para resolver un problema que sería demasiado complejo si no se dispusiera de un formalismo adecuado: estimar el costo metabólico de la locomoción de hominoides fósiles. El cálculo de los parámetros de locomoción de dichos ejemplares es una pieza esencial de la reconstrucción de su ecología conductual. Los estudios de nutrición (*foraging*) y de explotación de recursos necesitan calcular ese costo como un elemento clave en el presupuesto energético; la evaluación de las interacciones posibles entre predadores y presas también requiere establecer variables tales como la velocidad máxima que puede desarrollar un hominoide y el rango cotidiano de persecución. Estos valores no son fáciles de estimar ni siquiera para especies contemporáneas, y serían imposibles de obtener directamente de las formas fósiles. El estudio de Sellers describe una nueva técnica de simulación biomecánica de un hominoide, utilizando GA como técnica de optimización para definir un patrón de activación muscular que puede usarse para alimentar el modelo. El espacio de búsqueda de este problema sería demasiado grande para ser recorrido exhaustivamente, pero se sabe que el GA encontrará finalmente una solución dado un conjunto de criterios de optimización tales como eficiencia energética o máxima performance. La elección de los criterios, en todo caso, depende del problema ecológico para el cual se busque respuesta.

Para validar la técnica, Sellers ha construido una simulación simple de un torso, piernas y pies de un hominoide que en conjunto poseen una musculatura mínima para gobernar las articulaciones; la fuerza muscular es controlada en todo momento por un generador de patrones. Los parámetros del generador se codifican en un genoma simulado cuyo criterio adaptativo se calcula evaluando la eficiencia con que ese conjunto de parámetros produce la acción de caminar. Una población de genomas experimenta una evolución simulada basada en ese criterio de eficiencia, que también genera un conjunto de parámetros que la maximiza. Si la eficiencia incluye una medida de performance o de economía energética, la solución producida será una buena solución en relación con ese objetivo. Los resultados pueden validarse contrastándolos contra mediciones tomadas de humanos contemporáneos. La simulación de Sellers produce películas reminiscentes de las reconstrucciones computarizadas de hominoides que se suelen transmitir en documentales ingleses de televisión.

A diferencia de otros sistemas complejos, los modelos basados en AG no están asociados con una forma típica de representación gráfica. Todo depende de las herramientas que se utilicen en cada estudio, las cuales por lo general se programan a medida, de acuerdo con los fines de la investigación. Las únicas figuras recurrentes son los gráficos que miden la adecuación de los ejemplares a lo largo del tiempo. La figura 3.20 muestra la evolución típica de la adecuación de una población cualquiera en un programa desarrollado por un co-

lega del autor (Reynoso y Jezierski 2002: 510). El programa se presentó en el congreso del año 2001 de Computer Applications in Archaeology de Visby, Suecia; es un resolvedor de problemas de propósito general, útil para evaluar si un problema planteado converge hacia una solución en un tiempo razonable. En el gráfico se percibe la convergencia de los valores hacia el óptimo y los altibajos característicos por efecto de un *crossover* que segmenta cromosomas a ciegas.

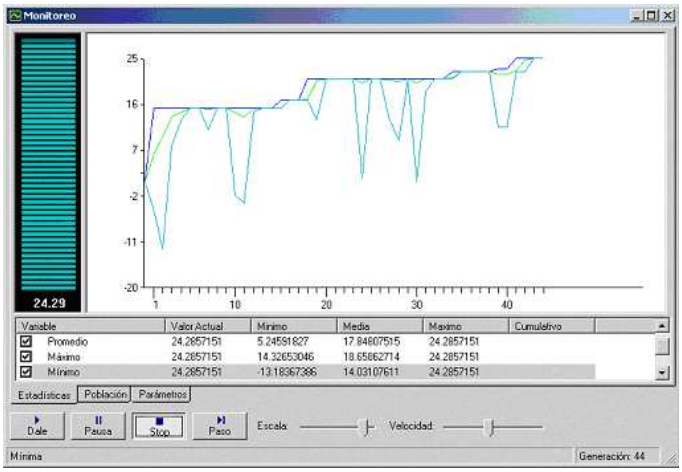


Fig. 3.20 – Evolución de la adecuación en un algoritmo genético

En algunos contextos, mejor que interpretar los gráficos de adecuación es mirar directamente la estructura fenotípica de las poblaciones. La fig. 3.21 muestra un ejemplo de evolución de una población de biomorfos ejecutándose en Genetic Algorithm Viewer, un programa de Jean-Philippe Rennard muy utilizado en la academia como herramienta pedagógica. Cada biomorfo es una configuración gráfica generada a partir de nueve genes (Dawkins 1986). El espacio combinatorio comprende alrededor de 8,8 billones de ejemplares posibles. En el panel de 25 cuadros de la izquierda aparece la población inicial con fenotipos al azar; el primer ejemplar, arriba a la izquierda, es el que se ha escogido para que oficie como criterio de evaluación. Los 25 cuadros de la derecha corresponden al estado de la población al término del proceso evolutivo, clasificados por orden de adecuación, es decir, por semejanza decreciente respecto del ejemplar de referencia. La ejecución de todo el proceso insume habitualmente unos pocos minutos en una computadora personal estándar; una búsqueda lineal de todas las combinaciones con el mismo equipamiento informático se prolongaría durante siglos. Un programa semejante para composición genética de imágenes es Kandid, que implementa evolución sobre poblaciones de fractales, sistemas-L, gráficos de vectores, diagramas de Voronoi, autómatas celulares o modelos tridimensionales.

Sería imposible mencionar todos los trabajos relevantes para nuestra disciplina y otros espacios del saber que han hecho uso de los AGs y de técnicas emparentadas. En ciencias políticas, Tim Hackworth (1999) se ha servido del AG para estudiar la escalada armamentística entre India y Pakistán como caso clásico de "carrera de Richardson", utilizando datos y categorías de los informes del Fondo Monetario Internacional y definiendo los escenarios que permiten predecir la inminencia de una crisis; el suyo es un aporte más a una clase de problemas que en su época Bateson abordaba en términos de esquismogénesis o de teoría de juegos. T. Smith y Kenneth De Jong (1981), este último un autor tan prolífico como Reynolds, utilizaron búsquedas basadas en AG para calibrar su modelo de migración pobla-

cional en Estados Unidos. Robert Axelrod (1985a, 1985b) simuló mediante AG la evolución de normas de conducta, y luego abordó el famoso dilema del prisionero, inventado por Merrill Flood y Melvin Dresher en la década de 1950; éste fue tratado tantas veces en la bibliografía que, francamente, ya se ha convertido más en un banco de pruebas que en un dilema aunque siga siendo el arquetipo de los problemas NP-duros (difíciles de resolver en tiempo polinómico) junto con el problema del vendedor viajero.

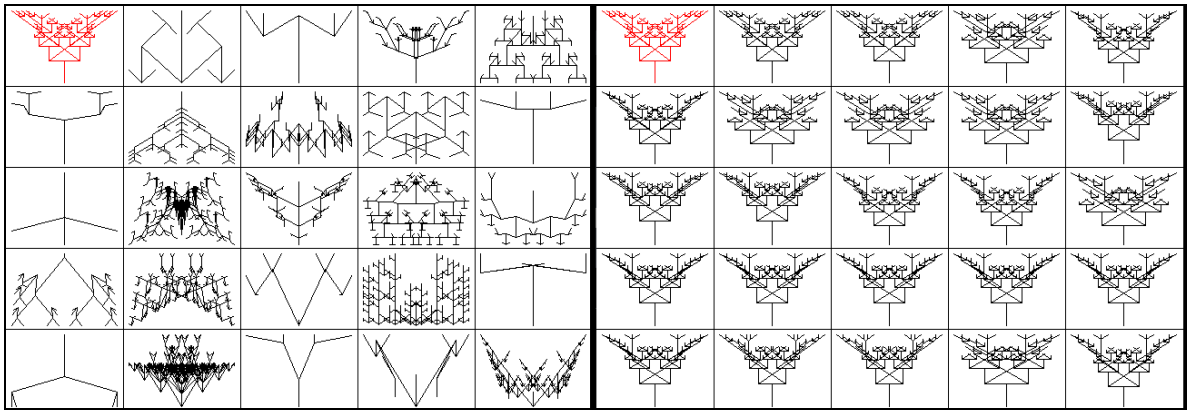


Fig. 3.21 – Evolución de población de biomorfos

En arqueología, F. J. Melero y otros investigadores de la Universidad de Granada implementaron AGs para generar interactivamente imágenes tridimensionales de vasijas ibéricas a partir de pequeños fragmentos (Melero y otros 2003). En sociología, Edmund Chattoe, de la Universidad de Oxford, analizó la dinámica de los oligopolios usando AGs en modelos de simulación. Mención aparte merecen las iniciativas de Peter Bentley, quien ha liderado un amplio movimiento de análisis y creación en artes visuales y música; esta corriente utiliza AGs y principios de síntesis fractal que van desde el ruido 1/*f* a las gramáticas generativas propias de los Sistemas-L de Lindenmayer (Bentley 1999; 2002). Estos proyectos indican que se está abriendo camino un movimiento de arte genético, como complemento a las corrientes, ya en plena marcha, de arte caótico y arte fractal. En los modelos genéticos de composición musical, el creador humano sólo oficia como evaluador de las composiciones generadas por una máquina algorítmica creativa, a la que se le presentan previamente ejemplos de música a través de una red neuronal que "aprende" a captar sus patrones, sin que éstos se codifiquen explícitamente.

La producción científica y artística en este espacio es extensa, y ha dado lugar a programas que componen y ejecutan música bastante aceptable, y hasta dan conciertos en festivales, como GenJam, un sintetizador evolutivo de John Biles (Cardalda y Johnson 2002; Biles 2004). En los últimos años han abundado proyectos que utilizan formalismos complejos para componer música y pintar imágenes, explotando los isomorfismos y sinestesias entre diversos órdenes de fenómenos. En casi todos los casos se han puesto de manifiesto dimensionalidades fractales, lo cual ocasiona que los sonidos y figuras resultantes ostenten una calidad peculiar, de un nivel que no es por cierto de excelencia, pero que no está muy lejos de los que los humanos sin toque de genio artístico pueden realizar "naturalmente" (Miranda 2003; Miranda y Todd 2003; Haupt y Haupt 2004: 67-71). La Web está inundada de alternativas de composición musical algorítmica, basadas en AGs, fractales, ACs, estructuras recursivas, series de Fibonacci o genética pura. El lector puede poner a prueba las técnicas de composición genética usando FractMus 2000, AMuGen o SoftStep, ambientes que se o-

frecen como *freeware* en la Web. En sitios que llevan nombres como Algorithmic Arts, EvoWeb o AudioGenetics hay varios programas que hacen lo mismo. Si se pretende una solución a medida, un buen desarrollador puede elaborar un programa genético en pocas semanas, ya sea para componer música, crear imágenes, plantear diversas clases de problemas o discernir si los que se están formulando califican como tales[9].

Es un acto de justicia insistir en el hecho de que el AG ofrece un espacio para explorar otra idea batesoniana esencial, que es la que intuía una equivalencia y una unidad entre la mente, la evolución biológica, el procesamiento de información, la comunicación, el cambio y el aprendizaje (M. C. Bateson 1991: 24). En ese terreno, hasta el momento de escribir este libro en antropología nadie llegó más lejos que Bateson. De esa cuestión se trata, precisamente, en su obra última y más rica, *Mind and Nature* (Bateson 1981), en buena parte de sus trabajos de edición póstuma (1991: 61, 280), así como en un artículo menos conocido sobre "Efectos del propósito consciente sobre la adaptación humana" de 1968 (Bateson 1985: 471-478). Aunque él jamás leyó nada de lo que ya se venía publicando en relación con el formalismo, ni proporcionó más que epigramas y metálogos circunstanciales a propósito de la cuestión genética, cabe considerarlo como una especie de precursor ocasional de las tendencias neo-darwinianas actuales; un precursor en modalidad Zen al que muy pocos programadores genéticos han leído o vayan a leer alguna vez, pero de quien cada modelo complejo que se ha desarrollado evoca siempre unas cuantas ideas.

En definitiva, con los algoritmos genéticos se dispone ya una herramienta regular susceptible de optimizaciones y adaptaciones sutiles para abordar problemas de complejidad arbitraria, demostrando en cada oportunidad que las dificultades emanadas de la cantidad de variables, el transcurso del tiempo, la manifestación de conductas emergentes y la dimensión del espacio de búsqueda son más medios que obstáculos para al menos una forma acotada de conocimiento e intuición. Si se desean representar las características borrosas de la cultura, el complemento de los conjuntos toscos o la lógica difusa ofrece la flexibilidad requerida. En lo que a las disciplinas humanas concierne, todavía resta elaborar la epistemología que corresponde, pero las piezas están en su lugar, y una visión como ésta puede ser el inicio. Más allá del optimismo simplista de la memética, lo concreto es que Darwin ha vuelto y vive en los territorios mismos de la complejidad, de los que esta vez costará expulsarlo.

---

[9] Incidentalmente, imagino que a los científicos sociales y humanistas seguramente les sorprenderá saber qué es lo que en teoría de autómatas o en lenguajes formales se denomina un problema (Hopcroft, Molwani & Ullman 2001: 31-32). La definición, ligada a algo tan aparentemente abstracto como la pertenencia de expresiones a lenguajes, involucra serias cuestiones de decidibilidad, tratabilidad, computabilidad, representación, etcétera, que distan de ser irrelevantes para la práctica científica y la teorización en cualquier disciplina, por cualitativa, informal y difusa que pretenda ser. Gran parte de mi propio método crítico se basa en una especie de forma débil de esta clase de principios, como se ilustra en el capítulo 4.3 a propósito de la gramática cultural de Benjamin Colby. Si se dan las condiciones, alguna vez desarrollaré con detenimiento este asunto.

4. Caos y complejidad

4.1 – Caos: Teoría y práctica

Quien busque referencias a una ciencia del caos anteriores a 1977 no las encontrará, salvo con un sentido distinto en un texto ridículamente temprano de Norbert Wiener (1938). Algunos aseguran que ella se origina como tal en un congreso organizado ese año por dos físicos, Joseph Ford y Giulio Casati, en la villa de Como, Italia. Concurrió un centenar de científicos, físicos en su mayoría, y la conferencia no tuvo entre ellos mayor impacto. Pero en los años siguientes la ciencia del caos se iría definiendo poco a poco, hasta adquirir autoconciencia plena en la segunda mitad de la década de 1980. No es una disciplina homogénea, sino un conjunto politético cristalizado en torno a unos cuantos conceptos que congrega a teóricos, académicos, investigadores empíricos, periodistas científicos y *nerds* de todo tipo. Esta multitud no se habría congregado si la disciplina se hubiese llamado dinámica no lineal, pues de eso fundamentalmente se trata.

En el sentido vulgar, religioso y literario, la palabra "caos", que pudo haber hecho su aparición 700 años antes de Cristo en la *Teogonía* de Hesíodo, implicaba "nada sino el vacío, la materia sin forma, el espacio infinito", desorden, turbulencia. Después de ese debut viene una larga historia literaria o pre-científica, que no vale la pena revisar aquí. La primera definición matemática es la de Tien-Yien Li y James Allen Yorke en un ensayo que se ha tornado clásico y que llevaba por título "Period three implies Chaos" (Li y Yorke 1975). Formalmente, el caos se refiere al problema matemático de la dependencia sensitiva a las condiciones iniciales. En otras palabras, se llama caótico a todo sistema en el cual la relación entre los valores iniciales y valores de su trayectoria ulterior no es proporcional. Robert May (1976), matemático y biólogo bien conocido en su especialidad, refrendó la definición en sus trabajos, y a partir de entonces el concepto quedó firmemente establecido.

Entre paréntesis, cabe señalar que las condiciones iniciales no tienen por qué ser las existentes en el momento en que se originó el sistema. Los adversarios de las ciencias del caos y los lectores presurosos creen que en dinámica no lineal las predicciones y el modelado son imposibles porque las condiciones iniciales son desconocidas, no pueden retrodecirse o se remontan al Big Bang. No es así: dichas condiciones son sólo las que se dan al comienzo de un experimento o un cálculo, o al principio de un período que interesa al investigador, de modo que lo que para alguien son condiciones iniciales pueden ser para otro condiciones intermedias, o finales (Lorenz 1995: 7).

Para comprender el nombre del trabajo de Li y Yorke es menester distinguir entre los sistemas dinámicos que varían según pasos discretos, que se conocen técnicamente como *aplicaciones* o *mapas iterados*, y los que varían en forma continua, llamados *flujos*. Las herramientas matemáticas que se ocupan de las aplicaciones son las ecuaciones de diferencia: un conjunto de fórmulas que, juntas, expresan los valores del siguiente paso en función de los valores actuales. Las herramientas para estudiar los flujos, en cambio, son las ecuaciones diferenciales: un conjunto de fórmulas que constantemente expresan las tasas de cambio de las variables en función de los valores actuales de las variables. Como algunas ecuaciones diferenciales son intrínsecamente irresolubles, se acostumbra crear una aplicación a partir

de un flujo observando su comportamiento en determinados intervalos de tiempo (Lorenz 1995: 10-11; Strogatz 1994: 5).

En una aplicación, una secuencia de período tres es aquella en la que cada estado es idéntico al que se dio tres pasos antes, pero no al estado de uno o dos pasos anteriores. Li y Yorke demostraron que, para determinada clase de ecuaciones de diferencia, una única solución de período tres implica la existencia de una colección infinita de soluciones periódicas y otra colección también infinita de soluciones no periódicas. En otras palabras, en esta situación puede darse cualquier clase de comportamiento, lo que es propio de la definición técnica del caos. En efecto, la ausencia de periodicidad, más que la sensitividad a los valores iniciales, se utiliza con frecuencia como criterio definitorio del caos. Aunque no todos coinciden en la distinción o en su terminología, existe una división marcada entre el caos limitado (o los regímenes caóticos ordenados) y el caos profundo o hiper-caos, identificable con el azar sin forma (Lorenz 1995: 20, 130). El hallazgo de Li y Yorke, hoy se sabe, resultó ser una forma más particular o un corolario de un teorema bien conocido del ucraniano Alexander Šarkovskii (1964).

Todo el vocabulario canónico de las ciencias del caos está relacionado entre sí. Sorprendentemente, no se trata de un vocabulario extenso, y aunque algunas definiciones son brumosas, está mejor consensuado que, por ejemplo, la terminología relativa a la cultura en antropología. Al llevar el vocabulario a una investigación, a veces hay que optar por un modelo genérico de filo del caos en detrimento de otro específico de criticalidad (o a la inversa), pero en general se trata de ideas complementarias, armónicas, sencillas y universalistas, lo más alejadas que puede imaginarse de los estereotipos dominantes sobre estas teorías como dominio de la oscuridad.

A fin de explorar las estructuras matemáticas propias del caos en un caso práctico, propongo ocuparnos inicialmente de una entidad cuantitativa bien conocida, la ecuación logística, también llamada mapa logístico, mapa cuadrático, mapa de Feigenbaum, parábola logística de Robert May o ecuación de [Pierre] Verhulst. Es la forma más simple conocida del caos. La ecuación logística es familiar, bajo distintas expresiones matemáticas, para quienes han trabajado con dinámica de poblaciones o epidemiología. Conjeturo que será más motivador realizar la ejemplificación en base a ella y no mediante fenómenos alejados de la semántica de la sociedad y la cultura, como las pistas de esquí, las palanganas vibrantes, los péndulos con rozamiento, las reacciones autocatalíticas o la transformación del panadero, con las que los científicos dados a la divulgación acostumbran poblar sus pedagogías.

Uno de los estudiosos que estableció que expresiones matemáticas muy simples podrían desencadenar dinámicas muy complicadas fue el matemático australiano Sir Robert May (1973; 1976), uno de los pioneros de la ciencia del caos, por aquel entonces en la Universidad de Princeton. May descubrió además que en los márgenes de determinados rangos, la dinámica de una población a lo largo del tiempo puede fluctuar caóticamente: las diferencias que median entre el mantenimiento del equilibrio, la periodicidad y el caos puede ser del orden de los decimales. La ecuación es más antigua que eso; se sabía que era no lineal y caprichosa, pero se ignoraba que fuese exacta y paradigmáticamente caótica. Pierre François Verhulst la estudió antes de 1849, John von Neumann la usaba para generar números al azar hacia 1945, y en la década de 1950 Stanislav Ulam exploró con mayor detenimiento sus extrañas propiedades, pero sin llegar a identificarla con lo que luego se llamó caos.

La ecuación logística describe la dinámica de una población, así como otros fenómenos que responden a los mismos principios. Quien la formuló tuvo en cuenta los efectos de saturación de un ecosistema, que hacen que cuando una población llega al máximo posible que el medio ambiente puede sustentar, el parámetro que determina el crecimiento deba disminuir; eso equivale a considerar este parámetro como una función del número de individuos (Martín y otros 1998: 66). Hay que señalar sin embargo que la ecuación logística describe cualquier sistema de una sola variable con potencialidades caóticas: puede ser el ritmo de los chorros que salen de un grifo por unidad de tiempo, el comportamiento de un gas en función de la temperatura, o lo que fuere. Que haya un parámetro de control que mantenga los valores en un rango involucra retroalimentación negativa; utilizar el valor actual como base del cálculo del momento siguiente implica no sólo iteración, sino recursividad.

Trataré de explicar la ecuación logística brevemente, basándome con unas cuantas modificaciones en la caracterización del mapa logístico proporcionada por Edward Lorenz (1995: 198-99) y en un oportuno ejemplo de Douglas Kiel y Euel Elliott (1997); el lector podrá experimentar regímenes de equilibrio, periódicos o caóticos usando una hoja de cálculo electrónica. Aquí he utilizado Microsoft®Excel. La ecuación logística tiene la forma:

$$x_{t+1} = kx_t(1-x_t)$$

La variable a examinar es el valor x. El parámetro o valor de límite de la fórmula es una constante, k. El subscripto t representa al tiempo y es el valor actual de la variable x. El subscripto t+1 representa un período de tiempo de la variable x que sigue a la anterior, x_t. El factor $(1-x_t)$ implementa el efecto de recursos finitos. Para mapear la fórmula se requiere un valor inicial, que coincide con lo que en teoría del caos se denomina condiciones iniciales, y que se representa como el primer valor de x_t, o sea x_0. Los valores admisibles para x_t van desde 0 a 1; si es 0 se considera que la población se ha extinguido; si es 1, que existe superpoblación. Por lo dicho, si se quiere examinar el comportamiento dinámico de la ecuación logística en una hoja de cálculo, se deberá tener cuidado de establecer como valor inicial una fracción tal que $0<x_0<1$, y el valor de la constante k debe ser mayor que 0 y menor que 4. La constante representa en ese rango la tasa de reproducción; si es 0, no la hay en absoluto, y si es 4 la población se reproduce en el máximo de sus posibilidades.

En una hoja de cálculo, se puede escribir ahora:

1. En la celda A1, un valor fraccional para x_0 entre 0 y 1. Esta es la condición inicial.
2. En la celda B1, el valor de la constante k, mayor que 0 y menor que 4.
3. En A2, la fórmula =(B1*A1)*(1-A1). Este es el valor de x_{t+1}.
4. Copiar la celda A2 hasta A30, por ejemplo.
5. Generar el gráfico de línea correspondiente para las celdas A1 a A30.
6. Para cambiar la dinámica de la serie temporal, simplemente modifique los valores de las celdas A1 (x), y B1 (k) respetando valores de >0 y <1 para la primera y de >0 a <4 para la segunda.

Un aspecto fascinante de la ecuación logística es que cada régimen de conducta ocurre dentro de límites matemáticos perfectamente definidos. Por ejemplo, valores de k entre 0 y 3 convergen siempre a una situación de equilibrio estable después de una sacudida inicial. El comportamiento periódico comienza a ocurrir cuando $k > 3$; este régimen comienza con una oscilación característica que es identificable con una bifurcación; cuando el valor de k es de 3.5, aparece un período recurrente de 4 ciclos que se ha llamado duplicación del período, y

que eventualmente puede resultar en un "camino hacia el caos" (Feigenbaum 1978). Con k igual a 3.567 aparece un ciclo de 8 períodos, y a medida que k se incrementa pasa a ser de 16, 32, … hasta que se desemboca en el caos propiamente dicho. El comportamiento caótico se manifiesta con valores de k entre 3.8 y 4, un margen muy estrecho si se quiere; lo que distingue al caos de otros regímenes es la falta de patrón repetitivo en la trayectoria longitudinal, o más propiamente, la presencia de un patrón caracterizado por su aperiodicidad. El famoso período 3 de Li y Yorke se manifiesta con claridad entre 3.8284 $(1 + \sqrt{8})$ y 3.8415. En los gráficos de bifurcación (fig. 4.2) aparece como una ventana blanca, de bordes rectos, que interrumpe la continuidad de la zona de puntos caóticos. Vale la pena seguir la secuencia desde el equilibrio al caos, variando el parámetro poco a poco.

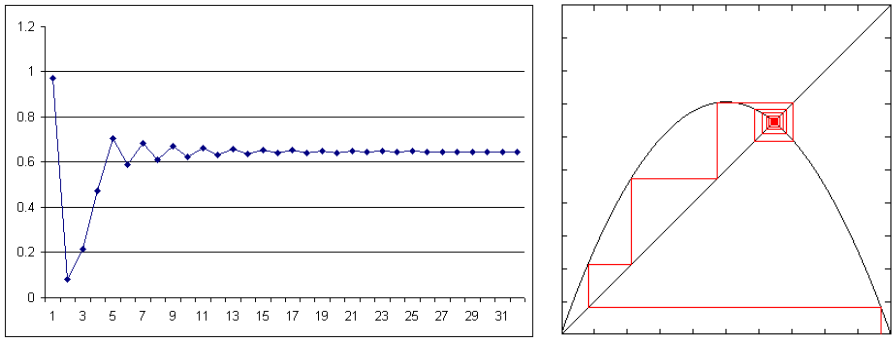


Fig. 4.0a – Atractor de punto fijo

El primer gráfico de la serie (fig. 4.0a la izquierda) muestra una circunstancia de equilibrio estable, con $x_0 = 0.97$ y k=2.827. Valores diferentes de condición inicial resultan en discrepancias en las primeras oscilaciones, pero a la larga la conducta se estabiliza. La situación es igual a la que en los autómatas celulares y redes booleanas llamábamos de punto fijo; en esos rangos, el escenario mostraría una cuenca de atracción que tiene área y volumen tendiente a cero. A la derecha he graficado el espacio de fases o serie temporal. La línea muestra la secuencia de iteraciones, alternando trazos horizontales y verticales entre la parábola y la diagonal. La base de la parábola representa x de 0 a 1 y la altura es $k/4$; el eje vertical denota x_{t+1}. Sólo los ángulos son significativos. Cuando hay un atractor de punto fijo, adopta la forma de escalera con un caracol hacia el final, sin que la línea se cruce nunca.

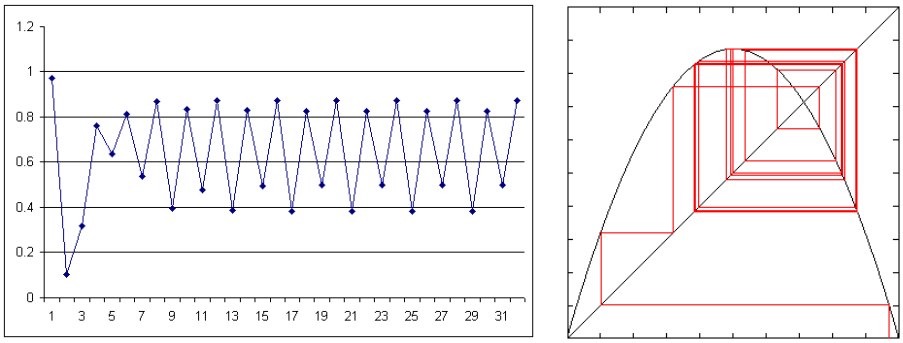


Fig. 4.0b – Atractor periódico

El ejemplo de la fig. 4.0b ilustra un comportamiento cíclico de período 4 (como en el momento en que se abren cuatro ramas en la bifurcación de Feigenbaum), para valores de $x_0 = 0.97$ y k=3.50. Pequeñas diferencias en el valor inicial resultarían en un corrimiento de los

ciclos en el tiempo, pero manteniendo la estructura del perfil cíclico. Nótese que una vez que se estabiliza, el ciclo se repite exactamente igual todo el tiempo. En el gráfico del espacio de fases, la línea se cruza de uno al otro lado de la diagonal y establece un patrón en tela de araña.

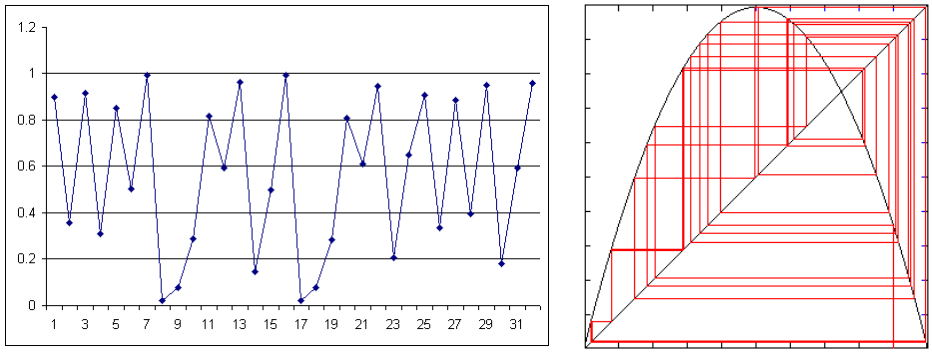


Fig. 4.0c – Atractor caótico

En la fig. 4.0c se muestra al fin un ejemplo clásico de comportamiento caótico aperiódico para x_0 = 0.90 y k = 3.98. Igual que en la progresión de los estados del tiempo ilustrado en el atractor de Lorenz (fig. 4.1), ningún patrón de secuencias de larga duración se repite en el tiempo exactamente de la misma manera. La aperiodicidad difiere además de lo que sería un patrón aleatorio. Una curva aperiódica como la del gráfico es una representación de lo que se llama ruido 1/*f*, el cual se examinará más adelante: la música humana (excepto la aleatoria o la estocástica) se ajusta a un patrón de ese tipo. El gráfico del estado de fases de la derecha muestra una línea que tiende a cubrir densamente una región del espacio. Señalo dos consecuencias importantes de esta pauta temporal: primero, que dado un valor x_t no es posible determinar el valor que tenía anteriormente; segundo, que ni aún conociendo una serie más larga sería posible hacerlo. La ecuación es no-invertible: para k=2, tanto x_0=0.2 como x_0=0.8 producen x_1=0.32 (Sprott 1993: 11). Es determinista en el sentido que dos señales idénticas producirán la misma conducta; pero nadie puede decir cuál ha de ser (Ditto y Pecora 1993: 71). Es sorprendente que Bateson (1981: 24-25), sin conocer nada de esta ciencia, caracterizara esta situación a fuerza de intuición pura.

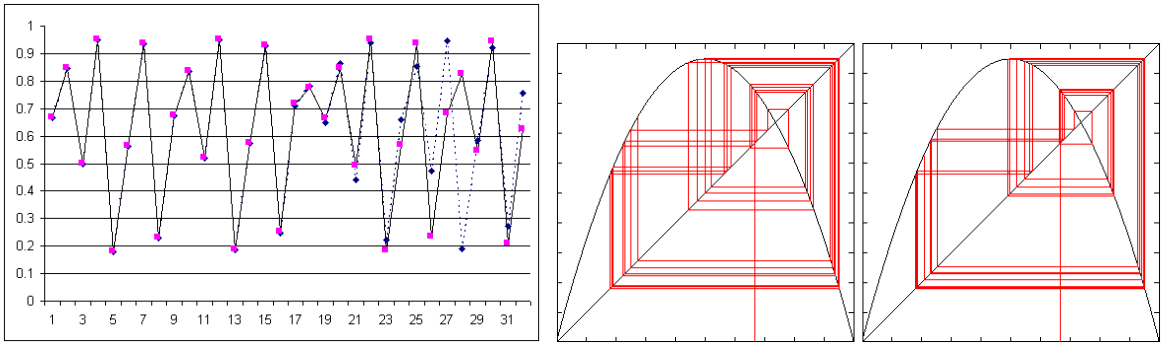


Fig. 4.0d – Sensitividad a las condiciones iniciales

El gráfico 4.0d ilustra lo que en teoría del caos se conoce como sensitividad a las condiciones iniciales; siendo k = 3.80, la línea sólida corresponde a un valor inicial de x_0 = 0.666666 y la línea punteada a x_0 = 0.666333. Se demuestra entonces que cuando en dinámica no lineal se presentan condiciones de caos, es imposible realizar una predicción a largo plazo, pues los valores comienzan a diferir en algún momento, aún cuando la diferencia entre los

valores iniciales sea mínima y las leyes que rigen el sistema se conozcan a la perfección. Para poder predecir a un plazo 10 veces más largo, hay que aumentar la precisión en un factor de n^{10}. Este es el famoso efecto de las alas de mariposa, y es un elemento de juicio sumamente importante para los científicos sociales, dado que demuestra con toda contundencia que sistemas casi idénticos pueden desarrollar historias distintas. La situación, como ya se ha visto, es distinta en los escenarios de estado estable; en ellos todo se estabilizará a la larga, aunque los caminos para llegar al equilibrio pueden ser divergentes al principio.

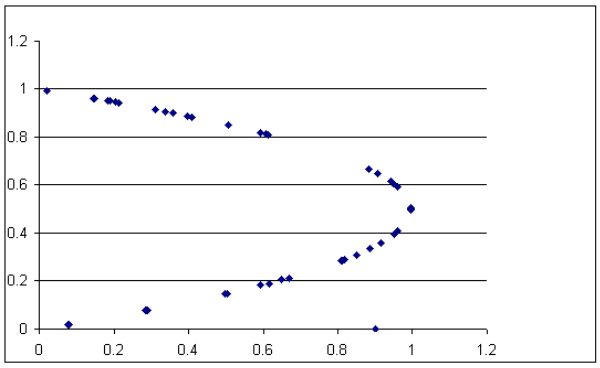


Fig. 4.0e – Atractor extraño

En este último gráfico de la serie (fig. 4.0e) he querido mostrar la formación de un atractor caótico, un patrón subyacente a los datos que estamos examinando. Diré más sobre el concepto de atractor unas páginas más adelante. Por el momento digamos que el efecto de atractor en la ecuación logística se revela ploteando en un gráfico de tipo XY los valores de la misma serie caótica del caso anterior como eje X y una copia de los mismos valores, desplazados una celda hacia abajo (con valor cero en la primera celda), como eje Y.

Técnicamente esto es lo que se llamaría un mapeado de los datos en un espacio de fases, lo cual puede traducirse como el cambio de los datos en el curso del tiempo (Baumol y Benhabib 1989: 91). Lo que denota la figura es que cuando el mapa logístico opera según un régimen caótico, se genera un atractor en forma de hipérbole perfecta, apareciendo una estructura subyacente que ilustra la aparición de orden a partir del caos: la evolución temporal de un sistema se percibe como si fuera "empujada" hacia puntos matemáticos identificables, y el atractor funciona así como una representación abstracta del flujo del sistema que nos permite analizar visualmente el orden escondido en un proceso dinámico no lineal. Con otra técnica de graficación y otros valores de variable, esa parábola representa la misma clase de trayectorias que las bifurcaciones de Feigenbaum. Aquí hay caos, no azar; si las cifras fueran al azar, los puntos aparecerían desperdigados en una línea sin patrón discernible.

El ejemplo que he desarrollado hasta aquí se puede hacer más rico para adaptarlo a distintos problemas. Un caso a cuento es la dinámica de predador y presa, en la cual se considera no ya uno sino dos conjuntos de población interrelacionados. El modelo más simple de este tipo (aunque demasiado complejo para un texto como el presente) es el de Lotka-Volterra, consistente en dos ecuaciones diferenciales, una para cada especie. Un modelo más refinado aún es el de Arneodo, Coullet y Tresser (1980), capaz de considerar un número muy grande de poblaciones en interacción. Estos estudiosos crearon un método para tratar un conjunto arbitrariamente grande de grupos en interrelación en función de una sola variable, α, que, al igual que la constante k en la ecuación logística, hace que el sistema se comporte de forma

estacionaria, periódica o caótica. Para un escenario de tres especies en conflicto, por ejemplo, la matriz que expresaría el sistema sería la siguiente:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.1 \\ -0.5 & -0.1 & 0.1 \\ \alpha & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix}$$

Los autores encontraron que valores en el rango del ejemplo manifiestan conducta caótica cuando α es 1.5, estado estable si es 0.75 y periódico si es 1.2. En 1.32 aparece la primera duplicación de período, en 1.387 un atractor de período estable 4. Todas las magnitudes y comportamientos, aunque las matemáticas son distintas, son consistentes con la conducta de la ecuación logística y con sus magnitudes relativas. Más aún, el número de Feigenbaum se llama a veces número de Coullet-Tresser (Flake 1999: 181-201).

Definiré ahora lo que es un atractor: en el comportamiento de un sistema dinámico, es el conjunto límite que colecta trayectorias, la zona del espacio de fases hacia el que convergen los valores de comportamiento, formando en su torno cuencas de atracción. Los diversos autores coinciden en que existen cuatro tipos de atractores: (1) Atractor de punto fijo, (2) atractor periódico, (3) atractor de torus o semi-periódico, (4) atractor extraño o de mariposa. Mientras los tres primeros tipos no son caóticos, el cuarto lo es por excelencia. Un atractor extraño es un tipo que tiende a adquirir, cuando se lo grafica, una forma geométrica fractal; corresponde a procesos que son estables y confinados, pero que nunca hacen lo mismo más de una vez. La imagen más representativa de esta clase de atractores es la gráfica del meteorólogo Edward Lorenz que demuestra la naturaleza caótica de la sucesión de los estados del tiempo, descubierta experimental y accidentalmente en 1962 (Lorenz 1978; Ruelle 1980). Como todo fractal, su geometría presenta autosimilitud: cada evento, proceso, período y cambio de estado es similar a cada otro, pero jamás idéntico. Aunque el sistema no es estable, posee un orden pautado y un límite; y aunque el sistema es determinista, los estados del tiempo a largo plazo son impredecibles. Como diría Murray Gell-Mann (1994), cuanto más exactas sean las mediciones, más imprecisas serán las leyes.

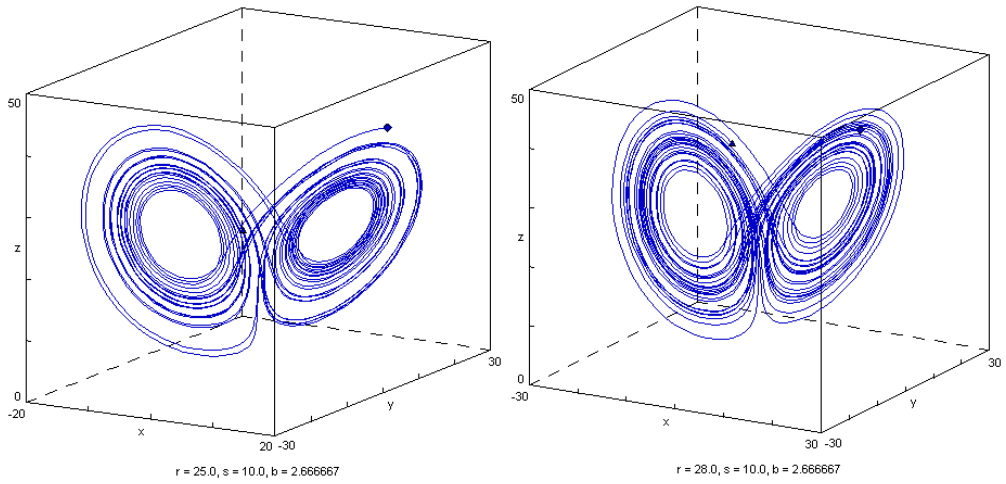


Fig. 4.1 – Atractores de Lorenz para distintos valores de la variable *r*

El célebre gráfico se confunde además con el no menos famoso "efecto mariposa" que la curva describe, y que más técnicamente concierne a la dependencia sensitiva de las condiciones iniciales, y a la aperiodicidad. El hallazgo conceptual de Lorenz resultó de un acci-

dente. Examinando las gráficas predictivas del clima a partir de determinadas condiciones iniciales, y debiendo retomar un proceso interrumpido, Lorenz descubrió que los comportamientos discrepaban inquietantemente en el largo plazo si introducía valores iniciales que difirieran en una pequeñísima cifra decimal, del orden de los diezmilésimos o aún menos: formalmente, eso significa que la predicción del estado del tiempo a largo plazo es y será imposible, aunque más no fuere por el simple efecto de las operaciones de redondeo. El gráfico corresponde a la trayectoria temporal de un valor en un espacio de fases tridimensional; si se variaran las condiciones iniciales en una pequeña medida (de modo que la diferencia no se notase a simple vista), los detalles de la figura cambiarían por completo Ruelle 1993: 69). El aspecto general seguiría siendo el mismo, pero los números de vueltas sucesivas a derecha e izquierda serían distintas, como se muestra en la figura 4.1.

Lorenz rememora que cuando mostró sus hallazgos a otro meteorólogo, éste señaló que si la teoría era correcta, un aleteo de una gaviota podía ser suficiente para alterar el curso del clima para siempre. En el momento de exponer su modelo en Washington en 1972, la gaviota se había convertido en una mariposa, y el título del trabajo que expone la gráfica quedó como "Predictability: Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?" (Lorenz 1995: 185-188). Quieren las coincidencias que la idea de la sensitividad a las condiciones iniciales y la del aleteo de la mariposa hayan aparecido antes, juntas, en *A sound of thunder*, un cuento de Ray Bradbury de 1952 que todo el mundo debe haber leído, en el que una mariposa aplastada en un viaje en el tiempo ocasiona una transformación en el curso de la historia (Lorenz 1995: 12).

Otro concepto cardinal de las teorías del caos sería el de *bifurcación*, que en sentido usual describe la partición de una curva en dos o más trayectorias. En teoría del caos se aplica más bien cuando en un sistema dinámico que deviene inestable a causa de perturbaciones o estrés, el sistema se bifurca en un punto de transición de fase y es impulsado ya sea a un nuevo orden o a la desintegración. Esto es lo que, desde las viejas teorías de sistemas o desde las primeras intuiciones de Alan Turing (1952), se viene llamando morfogénesis; ahora se considera que una bifurcación se presenta como el surgimiento de nuevos atractores. En los trabajos de Ross Ashby en la primera cibernética se reconocían tres clases de bifurcaciones: (1) sutil, en la cual la transición es suave; (2) catastrófica, la cual es abrupta y resulta de una perturbación excesiva, y (3) explosiva, en la cual la transición es súbita (Ashby 1960).

En la actualidad las bifurcaciones son mucho mejor conocidas y se clasifican con una nomenclatura reminiscente de las catástrofes de Thom en (1) vuelta de campana (*flip*) (2) pliegue (también en nodo de montura o tangente), (3) horqueta y (4) transcrítica (Rasband 1990; Strogatz 1994). Los tipos de bifurcaciones ilustran el concepto de *rutas hacia el caos*; aunque se estima posible que todavía se descubran unas cuantas modalidades en la forma en que un sistema se torna caótico, hoy por hoy existen unas pocas clases de transiciones, lo cual autoriza a presumir que los caminos hacia el caos son universales, independientemente del objeto que se trate. Al menos para modelos de baja dimensionalidad, en los últimos veinte años se ha demostrado que las transiciones exhibidas por los sistemas experimentales y las ecuaciones que los describen pueden agruparse en un puñado de categorías generales (Kadanoff 1983: 51; Hilborn 2000: 121-122).

En los sistemas caóticos, la respuesta común a una leve alteración en alguna constante producirá una modificación igualmente leve del atractor y ligeros cambios en otras propieda-

des. Sin embargo, en algunas ocasiones un cambio imperceptible en una constante producirá un cambio cualitativo en el comportamiento del sistema: de estacionario a periódico, de estacionario o periódico a cuasiperiódico, o de cualquiera de ellos a caótico, o también a la inversa. Estos cambios son bifurcaciones (Lorenz 1995: 70). Obsérvese en la figura 4.2, verdadero símbolo de la dinámica no lineal, la presencia del célebre "período tres" de Li y Yorke; si se ampliara la representación se podría observar que en esa ventana del caos se presentan duplicaciones (3, 6, 12…) que también exhiben la regularidad señalada por Feigenbaum. Para la ecuación logística el eje horizontal representa *k* y el vertical *x*.

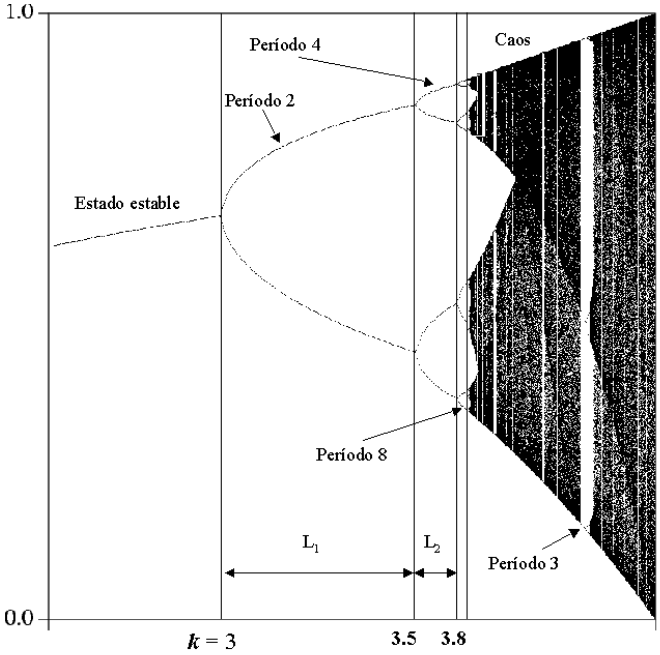


Fig 4.2 – Bifurcación (diagrama de órbita)

Aunque en el atractor que estábamos considerando existe impredecibilidad local, ésta no impide la predecibilidad global de la aparición de turbulencias; Mitchell Feigenbaum (1981) demostró que las relaciones numéricas que se manifiestan en un sistema caótico son universales e invariantes, y se aplican a cualquier sistema caótico, se refiera éste al clima, la economía, el crecimiento de la población, la evolución sociocultural, los motines, los terremotos o los ataques cardíacos, e independientemente del modelo de ecuaciones que se adopte. Hoy en día, el número de Feigenbaum (4.6692016090…) es una constante universal tan bien conocida en las ciencias del caos como la constante π lo es en la geometría euclideana. Cliff Pickover (s/f), promotor pionero del arte fractal, lo ha definido como uno de los quince números trascendentales más importantes de las matemáticas.

Así como el icono que representa el atractor de Lorenz es ese trayecto de vértigo que se asemeja a las alas de mariposa y que jamás se cruza consigo mismo, el emblema gráfico que muestra en acción a la constante de Feigenbaum es la ya familiar bifurcación caótica. La interpretación gráfica de cualquier bifurcación es harto intuitiva: el sistema pasa de estado estable a oscilar en ciclos de 2, 4 y 8 períodos, para luego precipitarse en el caos; cada cambio de régimen ocurre 4.6692016090… veces más pronto que el cambio de régimen anterior. La constante universal de Feigenbaum expresa una característica universal de todos los sistemas que se auto-organizan en las proximidades del caos. En este sentido, abre las puertas

a una exploración de amplias posibilidades, a condición que se definan adecuadamente las variables y sus parámetros de control.

Los atractores están relacionados con una característica adicional del caos, que es la *ergodicidad.* El principio ergódico establece que la trayectoria de un sistema caótico retornará siempre a una región. Si se define un punto cualquiera de la trayectoria anterior y una distancia, con tal que esa distancia sea mayor que cero, la trayectoria pasará por esa región comprendida entre el punto y la distancia en algún momento. Simplificando mucho la idea, podría decirse que la ergodicidad garantiza que sea cual fuere la situación climática de un momento en particular, algún día volverá a ser *casi* la misma, dado que el clima está articulado por una secuencia aperiódica que visita la vecindad de todos los puntos del intervalo. Se dice también que un sistema caótico tiene propiedad de mezcla (o es topológicamente transitivo) si dados dos intervalos cualesquiera de longitud positiva y arbitrariamente pequeños, siempre existirán puntos visitados por la trayectoria de las órbitas (Martín y otros 1998: 158-160).

Este párrafo puede saltearse sin culpa si no interesan las complicaciones matemáticas, pero puede ser de provecho si se quieren vincular algunos aspectos del caos y la aperiodicidad con otros elementos de juicio que se han ido revisando. Si en la ecuación logística se efectúa un reemplazo tal que $c = k/2 - k^2/4$, y $z = k(1\text{-}2x)/2$ (lo cual es una sustitución matemáticamente aceptable), la ecuación se convierte en

$$z_n{+}1 = z_n{}^2 + c$$

que es otra forma conveniente. En el escenario caótico con k entre 3.57 y 4, los valores que se obtienen forman un conjunto de Cantor cuya dimensión se aproxima a 1. En la ecuación modificada, las dos primeras bifurcaciones del período se dan cuando $c = -3/4$ o bien cuando $c = -5/4$. Todas las razones $(c_\infty - c_{I\text{-}1})/(c_\infty - c_I)$ convergen a 4.6692016090… que no es otra cosa que la constante universal de Feigenbaum. En otras palabras, cada vez que se pasa de un régimen periódico a uno caótico, la cascada de bifurcaciones (el paso de período 2, al 4, al 8…) se comporta de acuerdo con la constante universal. Todo es fractal por aquí; al extremo que si a alguien se le ocurre asignar números complejos a c y a z, la ecuación se articula de tal forma que con ella se genera el conjunto de Mandelbrot (Lorenz 1995: 198-199). De hecho, el rizamiento gráfico del fractal de Mandelbrot a lo largo del eje real negativo ocurre a intervalos que coinciden exactamente con el número de Feigenbaum.

Siguiendo un recorrido arbitrario, el concepto caótico que podríamos revisar ahora es el de *filo del caos*; bien conocido en el formalismo de los autómatas celulares a partir de la tipología de Chris Langton (Bak y Tang 1988; Langton 1991; Kauffman 1993, 1995). Fue bautizado con ese nombre por Norman Packard del SFI a fines de la década de 1980. Este borde o filo (*edge*) es, técnicamente, el lugar donde el sistema dinámico manifiesta su máximo potencial de performance óptima, un orden complejo, ultrasensible y sutil.

Algunos autores identifican este filo del caos con el orden implicado definido por David Bohm (1980) en su ontología holística, una visión cósmica basada en la mecánica cuántica, que se vincula a su vez con el paradigma hologramático y el principio de sincronicidad (Horgan 1998: 115-121). El orden implicado es el lugar en el cual el orden y el desorden se encuentran. Es curioso que una visión totalizadora unitaria y un mosaico de formalismos sobre bifurcaciones y máquinas que se auto-reproducen, sitúen el punto crítico en el mismo

lugar y le atribuyan características parecidas. Mitchell Waldrop ha descripto el filo del caos en términos que suenan como si los hubiera escrito allí. El filo es el lugar

> … donde los componentes de un sistema nunca se quedan en su lugar, pero tampoco se disuelven en la turbulencia. El filo del caos es donde la vida tiene suficiente estabilidad para sostenerse a sí misma, y suficiente creatividad para merecer el nombre de vida. El filo del caos es el lugar donde nuevas ideas y genotipos innovadores están siempre mordisqueando los bordes del status quo, y donde aún la vieja guardia más firmemente atrincherada será expulsada algún día (Waldrop 1992: 12).

Uno de los fenómenos que se manifiestan en el filo del caos es la *criticalidad auto-organizada* (CAO, o SOC en inglés). Anticipo que este nombre engorroso esconde una idea de seductora simplicidad, que ha dado lugar a una explosión de investigaciones en un número crecido de disciplinas, incluyendo antropología sociocultural, arqueología e historia del arte, como luego se verá. El concepto merece una ilustración detenida.

En la física clásica, un punto crítico es un punto en el cual un sistema cambia radicalmente su conducta o su estructura, por ejemplo, al pasar de sólido a líquido. En esos fenómenos críticos estándar, existe un parámetro de control que el experimentador puede variar para obtener ese cambio. En el caso del sólido que se derrite, el parámetro de control es la temperatura. En los fenómenos críticos auto-organizados, en cambio, los sistemas alcanzan un punto crítico de acuerdo con su propia dinámica interna, independientemente del valor de cualquier variable de control. El arquetipo de un sistema crítico auto-organizado es una simple pila de arena. Arrojando un hilo de arena lentamente sobre una superficie se forma una pila. A medida que la pila crece, ocurren avalanchas que transportan arena desde la cúspide hasta la base. Al menos en los modelos teóricos, la pendiente de la pila es independiente de la velocidad en que se arroja la arena. Esta es la *pendiente auto-organizada*, que se llama así incluso en casos en los cuales la pila no tiene forma de cono. En los sistemas de este tipo, un evento menor (un grano de arena adicional) puede desatar una reacción en cadena: el mejor ejemplo de una función no lineal.

Estas ideas fueron propuestas por Per Bak a principios de la década de 1990 y encontraron acogida permanente en las ciencias del caos, aunque el propio Bak es más bien partidario de las ciencias de la complejidad (Bak 1994; 1996; Bak y Chen 1991). Tienen la virtud invalorable de arrojar luz sobre el escurridizo concepto de auto-organización: la conducta de la pila de arena depende de la interacción entre los elementos, y no de un control exterior. Dado que el estado de la pila determina cuánta más arena hace falta para alterarla, un grano de arena puede tener una influencia desmesurada o no tener ninguna; la magnitud de la influencia está determinada por el estado actual, pero el estado siguiente está determinado por el grano de arena. Las avalanchas involucran a los elementos interactuantes en la pila, según las relaciones de comunicación y vecindad que mantengan entre sí. La misma escena, idea por idea, que se desenvuelve en los autómatas celulares complejos al filo del caos.

El tamaño y frecuencia de avalanchas (como los de los terremotos y los motines) parece obedecer a una distribución de ley de potencia (*power- law*), semejante a la ley de Zipf y a la ley de Pareto: los eventos pequeños son los más frecuentes, y los grandes los menos. Cuando se grafican las distribuciones de ley de potencia no resultan en el familiar histograma gaussiano campaniforme, sino en una distribución lineal que desciende brusca y monótonamente desde los valores más altos a los más bajos. Cuando ambos ejes son logarítmicos (log-log) la línea es recta. Matemáticamente, una ley de potencia significa que una cantidad

N se puede expresar como proporcional a la potencia de otra cantidad *r*. La fórmula es muy simple:

$$N = C / r^D$$

donde *C* es una constante y *D* es el exponente. En otras palabras, una cantidad *N* será proporcional a la potencia de otra cantidad *r*. Es de notar que la distribución de la ley de potencia no es ni trivial ni ubicua: las estaturas de las personas, el número de caras y cruces al revolear una moneda o el precio del pan se rigen por distribuciones de frecuencia estadísticas normales; la ley de potencia es una característica fractal (presente por ejemplo en el número de ríos que confluyen en una cuenca en relación con sus respectivas longitudes) que se encuentra en muchos ámbitos diferentes como la economía, la biología, la física y al parecer la cultura, sin que exista aún una teoría universalmente aceptada que explique su ocurrencia. En sismología (y dado que la escala de Richter es logarítmica) esta propiedad se conoce desde hace tiempo: por cada 1000 sismos de magnitud 4, habrá 100 de magnitud 5, 10 de magnitud 6 y así sucesivamente; es la ley de Gutenberg-Richter (Bak 1996: 12-14).

La misma situación se da en el número de ciudades conforme a su población, el de personas según su dinero (ley de Pareto), en el de empresas o países según su volumen de negocios, y en la frecuencia de palabras en cualquier texto (ley de Zipf), se trate de la Biblia o del periódico (Schroeder 1991; Gell-Mann 2003: 109-114; Boccara 2004: 311 y ss.). Un sistema crítico es, además, "independiente de la escala": en otras palabras, no hay un tamaño típico o único de avalancha, ni existe relación entre el tamaño del grano que desata una avalancha y las proporciones de ésta (Kauffman 1995: 236; Paczuski y otros 1996: 414). Matemáticamente esto se expresa como un espectro de potencia $1/f^D$, lo que involucra una auto-afinidad análoga a la de los procesos fractales (Paczuski y otros 1996). El exponente del espectro de potencia puede ser fraccional. Si fuera 1, por ejemplo, un suceso que involucra 5 agentes sería 100 veces más frecuente que un suceso que involucre a 500.

En un sistema de criticalidad auto-organizada las conductas más interesantes, como en todos los autómatas complejos que hasta aquí se han visto, ocurren en las transiciones de fase entre los dos extremos. (Una montaña a punto de desmoronarse es como una red booleana *NK* extremadamente susceptible; una pila aplanada y estable se asemeja a una red en la cual *K=1*). También se ha comparado la criticalidad con el "equilibrio puntuado" de Stephen Jay Gould que se aplica a procesos evolutivos como la extinción de especies y otros fenómenos temporales, aunque esa idea en particular está en discusión. Siendo que la criticalidad auto-organizada se vincula tan íntimamente con la geometría fractal, Per Bak ha especulado que los procesos críticos podrían *explicar* el carácter fractal de las morfologías naturales. Los experimentos del físico húngaro Tamás Vicsek, en efecto, han corroborado estas relaciones en modelos de formación de paisajes, perfiles de costa y geometrías de montañas; de este modo, los fractales pueden entenderse como fotografías instantáneas de procesos dinámicos críticos (Bak 1996: 75-77). Vicsek también ha estudiado el comportamiento de cardúmenes y bandadas de pájaros según principios semejantes de auto-organización (Vicsek 2001).

Tenemos aquí entonces, en un rincón de las teorías del caos, un elegante modelo de causalidad compleja construido a partir de ideas simples e intuitivas; una metáfora respaldada además por una robusta fundamentación matemática que la torna muy fácil de modelar usando, por ejemplo, formalismos de autómatas celulares, redes booleanas, generadores fractales o prosa en lenguaje natural. Más adelante revisaremos diversos usos de este modelo atrevido y polémico en antropología sociocultural y arqueología.

El capítulo más espectacular, mediáticamente hablando, en el uso de conceptos caóticos en la investigación en ciencias humanas tiene que ver con las redes independientes de escala, en adelante IE (Barabási 2003; Mendes y Dorogovtsev 2003). En los primeros años del siglo XX, las redes se consideraban como si fueran regulares y euclideanas en aras de la simplicidad; más tarde, en las cuatro últimas décadas, la ciencia trató la mayor parte de las redes empíricas como si éstas fueran aleatorias. Esta visión se originaba en el trabajo de dos matemáticos húngaros, el inefable Paul Erdös y su colaborador Alfréd Rényi. En 1959, tratando de describir redes que se manifestaban en fenómenos comunicativos, Erdös y Rényi sugirieron que esos sistemas se podían modelar con grafos no dirigidos conectando los nodos mediante vínculos al azar. La simplicidad de esta estrategia, basada en las redes que desde entonces se llamaron ER, hizo que floreciera la teoría de grafos y que surgiera una rama de las matemáticas especializada en redes aleatorias. Las redes ER son exponenciales: tienen un pico en un valor promedio y su caída es abrupta. En este modelo, todos los nodos tienen aproximadamente la misma cantidad de vínculos, lo que resulta en una distribución de Poisson en forma de campana, como se muestra en la figura 4.4 (c).

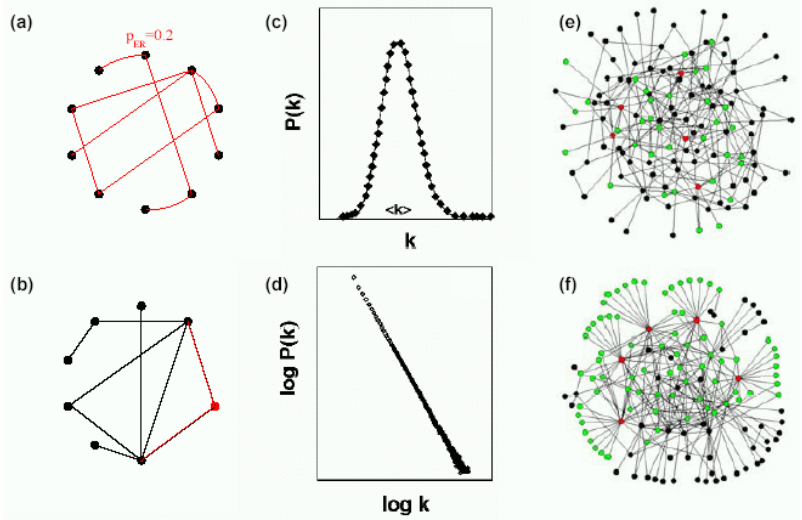


Figura 4.4 – Red aleatoria (a, c, e) y red independiente de escala (b, d, f)

Años más tarde, Duncan Watts y Steven Strogatz (1998) desarrollaron un modelo alternativo, llamado WS, intermedio entre las matrices regulares y las redes ER para dar cuenta del fenómeno de los mundos pequeños[10], perceptible en la experiencia cotidiana: dos personas que acaban de conocerse resultan conocer una tercera persona en común; dos individuos cualesquiera están separados por escasos vínculos intermedios. Las redes WS son también

[10] Esta propiedad de pequeños mundos y el mito urbano de los "seis grados de separación" se conocen desde los experimentos con cadenas de cartas de Stanley Milgram en 1967. Algunos autores afirman que las redes aleatorias también presentan estructura de mundo pequeño: si alguien conoce mil personas, y cada una de ellas conoce a otras mil, un millón de personas estará a dos grados de separación, mil millones a tres y toda la población del planeta a cuatro. Pero las matemáticas no son tan simples; las redes aleatorias tipo ER son modelos mediocres de pequeños mundos; las grillas regulares no pueden modelar pequeños mundos en absoluto (Boccara 2004: 283). Quien quiera probar el ejemplo más popular de estas redes (los grados de separación entre cualquier actor norteamericano y Kevin Bacon) puede experimentarlo en http://www.cd.virginia.edu/oracle.

exponenciales y homogéneas. A través de una serie relativamente compleja de fenómenos y teorías, las redes WS se vincularon a la larga con otra problemática organizacional compleja, que es la de la sincronización como proceso característico de los sistemas auto-organizados. En la actualidad Strogatz (2003) propone toda una nueva ciencia de la sincronización, relacionada con (pero ya emancipada de) el estudio de las redes WS. Con el tiempo se identificaron también otros tipos de redes (de vínculos débiles, de escala simple, de escala amplia, de Newman-Watts, modelo de Vázquez, etcétera); pero las que ahora veremos son las más propiamente complejas y las que están más preñadas de consecuencias para la investigación (Boccara 2004: 276-299).

En 1998 Albert-László Barabási, Eric Bonabeau, Hawoong Jeong y Réka Albert se embarcaron en un proyecto para trazar el mapa de la Web, pensando que iban a encontrar una red aleatoria. Las mediciones, empero, contradijeron esa expectativa: la totalidad de la Web se sustentaba en unas pocas páginas altamente conectadas, que en el modelo se identificaron como *hubs*; la gran mayoría de los nodos, comprendiendo más del 80% de las páginas, tenía menos de cuatro vínculos. Entre ambos extremos, todas las frecuencias estaban representadas. Contando el número de páginas que tienen exactamente k vínculos, resultó evidente que la distribución seguía un patrón de ley de potencia: la probabilidad de que un nodo estuviera conectado a k otros nodos era proporcional a $1/k^n$. El valor de n era aproximadamente 2, lo cual remite a las ideas de Stuart Kauffman y Per Bak. Cuando hay una distribución de ley de potencia, como ya se ha visto a propósito de la criticalidad auto-organizada (con otra notación por cierto), hay también independencia de escala: no hay una medida típica, ni hay valores promedios que describan el conjunto; para la estadística tradicional, esos sistemas son casi intratables. Era indudable que se había descubierto una nueva clase de red, mucho más generalizada en la realidad que la de Erdös y Rényi. La expresión "redes IE" (*scale-free networks*) fue acuñada por Barabási para referirse a esa clase. Las redes IE obedecen leyes de escala que son características de los sistemas que se auto-organizan.

Tras la primera comprobación, comenzó a hacerse evidente que las redes de este tipo aparecían en los contextos lógicos y materiales más disímiles: relaciones sexuales, agendas telefónicas, nexos sintácticos entre palabras en un texto o discurso, citas bibliográficas entre miembros de la comunidad académica, colaboraciones en reportes de investigación, alianzas tecnológicas, relaciones entre actores de cine, sinapsis neuronales, contactos entre personas en una organización, cadenas alimentarias, conexiones entre organismos vinculados al metabolismo o proteínas reguladoras, propagación de enfermedades y virus informáticos (Barabási y Bonabeau 2003; Liljeros y otros 2003). El centro neurálgico de las investigaciones en redes IE es la Universidad de Notre Dame en Indiana, donde Barabási dirige un grupo de investigación en el que participan numerosos estudiosos de origen húngaro; en el momento de escribirse este libro, los documentos esenciales se encontraban disponibles en http://www.nd.edu/~networks/papers.htm.

Los investigadores de Notre Dame descubrieron en esta clase de redes IE un número sorprendente de propiedades. Tienen, por empezar, una extraordinaria robustez: se puede destruir el 80% de los nodos que el resto seguirá funcionando. Pero también son extremadamente vulnerables a ataques selectivos: una eliminación del 5 al 10% de los *hubs*, que son poquísimos, alcanzaría para hacer colapsar al sistema o quebrar su unidad. El modelo IE permite conciliar el hecho que muchas redes reales presentan conglomerados o *clusters* je-

rárquicos, un factor que el modelo aleatorio ER no es capaz de tratar. Se sabe, además, que las redes IE surgen cuando a una red existente se agregan nuevos nodos, y éstos se ligan preferencialmente a otros que están bien vinculados. Esta vinculación selectiva se llama efecto de "el rico se vuelve más rico", o principio de San Mateo, bautizado así por el sociólogo Robert Merton muchos años atrás (Segarra 2001: 52; Barabási 2003: 79-92; Wang y Chen 2003: 14; Watts 2004: 108, 112). Aunque las elecciones individuales son impredecibles, como grupo todo el mundo sigue estrictamente unos pocos patrones.

Otras propiedades de las redes IE también desafían el sentido común: por razones que aún se ignoran, el valor de n en el término k^n de la ley de potencia tiende a caer siempre entre 2 y 3; dada la estructura de estas redes, además, cualquier nodo está conectado con cualquier otro con muy pocos grados de separación, alrededor de seis cuando los nodos son unos cuantos cientos de miles, no más de diecinueve entre cualesquiera de los tres mil millones de páginas de la Web. Por otra parte, en una red IE es posible encontrar nodos cuyo valor de conectividad supera *varias veces* el número promedio, lo que no es propio de las distribuciones aleatorias, como la que rige la tabla de estaturas de una población, donde nunca se encontrará una persona que sea cien o mil veces más alta que otra. Dada la distribución peculiar de estas redes, muchas de las técnicas estadísticas (muestreo, análisis de varianza y generalización) son inadecuadas para lidiar con ellas, puesto que presumen distribuciones normales; esto es algo que las ciencias sociales estuvieron ignorando hasta ahora.

Las teorías clásicas de la difusión, que se desarrollaron durante décadas en estudios de mercadeo y epidemiología, predicen un umbral crítico de conectividad para la propagación de un contagio, rumor o novedad a través de una población. Para que un virus se difunda, debe superar ese umbral; de otro modo terminará extinguiéndose. Pues bien, hace poco se demostró que en las redes IE el umbral es cero, lo cual implica que cualquier virus o elemento contagioso encontrará la forma de dispersarse y persistir en el sistema, por más que su capacidad de contagio sea débil. Esto tiene serias consecuencias para el planeamiento de campañas de vacunación, la distribución de ayuda humanitaria en situaciones de emergencia y otros escenarios similares: tomar como blanco los *hubs* más conectados es mucho más efectivo y económico que aplicar la solución a un porcentaje enorme de nodos. Inmunizando los *hubs*, por ejemplo, podría impedir que se propague una epidemia.

Dado que algunas redes son aleatorias (la red eléctrica o las carreteras de un país) y otras en apariencia análogas son IE (la red de aeropuertos, Internet), el investigador deberá encontrar de qué clase de red se trata usando el ya familiar gráfico log-log: si la red es IE, el logaritmo del número de nodos contra el logaritmo del número de vínculos resultará en una línea recta (Fig. 4.4, d). La "cola" de una distribución de este tipo tiene una caída mucho más suave que la de una distribución de Poisson. Las matemáticas de las redes IE son además muy simples y sus usos parecen ser innumerables; su marco teórico se vincula con problemáticas de auto-organización, criticalidad, percolación y hasta fractales, según se verá más adelante. En suma, los especialistas en redes sociales, circuitos de intercambio, estadística sociocultural o epidemiología de las representaciones harán bien en pensar de nuevo sus modelos tomando en cuenta lo que ahora se sabe.

Uno de los aspectos más interesantes de la teoría de redes IE es su vínculo con un conjunto de teorías físicas algo anteriores que luego proporcionarían fundamentos e intuiciones para las nuevas ciencias. Esas teorías se refieren a transiciones de fase de segundo orden, que son las que suceden de modo continuo. En 1965, el físico Leo Kadanoff, de la Universidad

de Illinois en Urbana, había determinado que en la vecindad de los puntos críticos, donde ocurren transiciones del desorden al orden o viceversa, diversos sistemas físicos se comportan conforme a leyes de potencia. Ese es el principio de *universalidad*, que rige con independencia del sistema; la palabra para designar este principio surgió en conversaciones sobre teoría de campo que Kadanoff sostuvo en un bar de mala muerte de Moscú con Sasha Polyakov y Sasha Migdal. La idea central es que en las cercanías de los puntos críticos sólo hay unas pocas soluciones diferentes a cada problema; muchos problemas en apariencia distintos tienen una misma solución, lo que equivale a decir que pertenecen a la misma clase de universalidad: cambiar el objeto empírico del modelo no cambia las respuestas. En los fenómenos críticos, las clases se definen a nivel macroscópico, describiendo el tipo de información que el sistema debe transferir sobre distancias largas (en relación con el tamaño de las unidades); en lugar de tratar el sistema en términos de sus unidades mínimas, reductivamente, lo que se hace es determinar una escala más molecular. Tanto la teoría como los experimentos han demostrado que este *scaling* es una de las claves de la universalidad y de los fenómenos colectivos (Kadanoff 1999: 159-160).

En dinámica no lineal pertenecen a una misma clase de universalidad los sistemas cuyas transiciones de fase posean el mismo conjunto de exponentes críticos. En teoría de redes complejas se pueden vincular así cosas tan diversas como las relaciones personales, la Internet, los ferromagnetos, las citas bibliográficas, la propagación de enfermedades y la percolación (Watts 2004: 65). En los estudios de auto-organización se reconocen como de la misma clase fenómenos emergentes tales como la formación de patrones ondulados en dunas de arena, las manchas en pelajes o conchas de moluscos, la sincronización de cardúmenes y bandadas, las soluciones autocatalíticas o los nidos de termitas (Camazine y otros 2002).

Sobre esta base, el físico de Cornell Kenneth Wilson propuso en 1971 una poderosa teoría unificadora de las transiciones de fase, conocida como teoría del grupo de renormalización, cuyo punto de partida es, una vez más, la invariancia de escala y la universalidad. Esta teoría afirma que las propiedades termodinámicas de un sistema cerca de una transición de fase dependen de un número muy pequeño de factores (tales como dimensionalidad y simetría) y es insensible a las características microscópicas del sistema; a la escala adecuada, es suficiente entonces considerar unos pocos grados de libertad. Wilson recibió un Premio Nobel por ese logro, e inspiró a Mitchell Feigenbaum en su búsqueda de la constante univeral. Todo lo que tenía que ver con bifurcaciones y auto-organización quedó incorporado de este modo bajo un marco amplio, conexo y elegante, aunque sólo algunos años más tarde estas ideas convergieron con la teoría de redes, la complejidad, los fractales y el caos (Kadanoff 1983: 47; Fáth y Sarvary 2003). Barabási lo expresa de este modo:

> La universalidad se convirtió en el principio orientador para comprender muchos fenómenos dispersos. Nos enseñó que las leyes de la física que gobiernan los sistemas complejos y la transición del desorden al orden son simples, reproducibles y ubicuas. Sabemos ahora que los mismos mecanismos universales que generan la forma de los copos de nieve también gobiernan la forma de las neuronas en la retina. Las leyes de potencia y la universalidad emergen en los sistemas económicos, describiendo la forma en que surgen las compañías y cómo fluctúan los precios del algodón. Explican cómo se agrupan en bandadas y cardúmes los pájaros y los peces, y cómo difieren los terremotos en su magnitud. Son el principio orientador detrás de dos de los descubrimientos más intrigantes de la segunda mitad del siglo veinte: el caos y los fractales (Barabási 2003: 255).

En este punto ya hemos revisado los conceptos fundamentales de la ciencia del caos: filo del caos, criticalidad auto-organizada, constante universal, clases de universalidad, determinismo, sensitividad a las condiciones iniciales, atractores, bifurcaciones, duplicación de período, aperiodicidad, distribuciones de ley de potencia, ruido 1/*f*, independencia de escala, orden a partir del caos, grupo de renormalización, ergodicidad y propiedad de mezcla. Hay unos cuantos más, por supuesto, pero con éstos por ahora alcanza. ¿Quién dijo que el caos es incognoscible?

4.2 – Caos y criticalidad auto-organizada en las ciencias sociales

En esta sección incluiré referencias a estudios que utilizan conceptos de la teoría del caos que fueran explicados en el apartado anterior y que no se refieren de manera directa a fractales, por más que técnicamente puedan vincularse con principios de auto-similitud. La separación entre estos estudios y los que tratan de geometrías fractales en la cultura es arbitraria, pues las geometrías de los procesos de criticalidad, bifurcaciones, auto-afinidad y distribuciones de ley de potencia son de hecho fractales. En particular, el concepto de criticalidad parece uno de los mejor establecidos; se ha aplicado a fenómenos tan dispares como sistemas mecánicos, evolución de especies, ecosistemas, fluctuaciones del mercado de valores, expansión de incendios forestales, congestiones de tránsito en carreteras, crecimiento y uso de la Web, expansión de ciudades y suburbios, desarrollo de carreras profesionales en consultoría de administración, redes de actores de Hollywood, estadísticas de ventas de discos de música popular, magnitud de las guerras en la historia, colapso de sociedades y financiación de proyectos universitarios de investigación (Brunk 2002; Barabási 2003; Watts 2004).

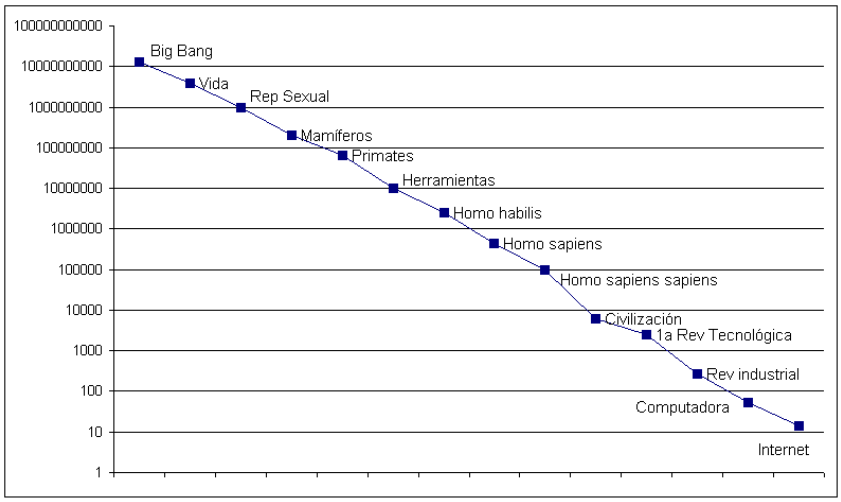


Fig. 4.3 – Número de Feigenbaum en la secuencia evolutiva

Una indagación más que sugestiva fue realizada por Nick Hoggard, ingeniero de software sueco interesado en la evolución y la conciencia (nick.hoggard@rocketmail.com). Hago referencia a ese modelo porque ilustra la forma en que se puede plantear una pregunta de interés antropológico utilizando un principio que parecería tan abstracto como lo es sin duda un número trascendental. El estudio de Hoggard modela el proceso de evolución, comprendiendo desde el Big Bang en adelante, y definiendo puntos de inflexión tales como la aparición de la vida sobre la tierra, el comienzo de la reproducción sexual, las manifestaciones

iniciales del uso de herramientas, el advenimiento del *Homo sapiens*, las primeras civilizaciones, la revolución neolítica, la revolución industrial, la invención de las computadoras y la generalización del ciberespacio de la World Wide Web.

Hoggard utiliza una escala logarítmica, de modo que los intervalos decrecen sobre la línea a medida que la dimensión del tiempo avanza. La simple premisa es que si el universo es un sistema dinámico no lineal, se deberá encontrar la constante de Feigenbaum en su evolución. El hallazgo del experimento es sorprendente: dichos eventos (uno de los cuales, no incluido en el dibujo, no ha podido identificarse cual pueda ser) ocurren exactamente en los intervalos predichos por dicha constante. Esto por un lado confirma que la evolución procede a velocidades que se aceleran, y por el otro sitúa el cambio cultural como continuación emergente de los procesos naturales. Sea que el descubrimiento esté bien articulado o refleje en cambio una casualidad numerológica, el ejemplo ilustra la forma en que podrían aplicarse estos modelos caóticos en una hipótesis de trabajo referida a procesos de cambio acelerado. Dado que los tiempos se comprimen por el mismo factor de Feigenbaum, el modelo vaticina además un punto de acumulación (o sea, el ingreso a la fase de caos profundo, infinitamente compleja) para poco después del año 2004, con cierto factor de tolerancia por redondeo. Expertos en futurología tecnológica, como Ray Kurzweil, han pronosticado (basándose en la Ley de Moore) cambios severos para esta misma época, en la que la tecnología está alcanzando ya sus límites cuánticos (Kurzweil 1999).

Desde el punto de vista matemático, el número de Feigenbaum no se refiere a una duplicación de período que ocurre a lo largo del tiempo; la duplicación es una función del valor del parámetro de la ecuación logística, por lo que el procedimiento de Hoggard me parece equívoco. Pero aún cuando pueda ser fruto de una mera coincidencia y sea matemáticamente sospechoso, el trabajo pone de manifiesto una heurística que merecería cierta atención, por cuanto la constante universal podría utilizarse para verificar si los sucesos a tratar en una investigación en la que haya una dimensión de tiempo están bien definidos: si se ha delimitado satisfactoriamente un sistema dinámico en aceleración constante, sus inflexiones o cambios de estado en el camino hacia el caos deberían aproximarse al *orden de magnitud relativo* de los intervalos predichos. Estimo que, a escala humana, dada la progresión inherente al número de Feigenbaum, el esquema sirve sólo para secuencias autónomas cuyo intervalo inicial sea relativamente muy amplio, que consistan en no más de cinco o seis etapas y que experimenten un incremento constante. La forma más simple de aplicar el modelo es retrocediendo en el tiempo, tomando como punto de partida para la retrodicción de eventos el último intervalo conocido. En la misma tesitura de la propuesta de Hoggard, Alvin Saperstein analizó la carrera de armamentos de la Unión Soviética y de Alemania antes de la Segunda Guerra, encontrando una duplicación de período en el orden de magnitud previsto por el número de Feigenbaum, que desembocó en un escenario de caos justo en el momento de inicio de la conflagración (Saperstein 1984; Peak y Frame 1994: 176-186). Una vez más, el hallazgo debe ser tomado con precaución; lo menciono aquí no porque esté de acuerdo con esta interpretación, sino para documentar su existencia.

Aunque la investigación arqueológica está tomando contacto en estos días con los modelos de la complejidad y el caos, el número de estudios realizados en esos términos es hasta ahora modesto (Pruecel y Hodder 1996: 28; Renfrew y Bahn 1996: 473; Bintliff 1997). Existe un trabajo, empero, que ilustra convincentemente el uso de la idea de criticalidad auto-organizada en el estudio de la sucesión de estilos artísticos arqueológicos. Se trata de un ensayo

de Alexander Bentley y Herbert Maschner (2001) sobre la dinámica de cambio histórico de tipos cerámicos prehistóricos de Arizona, identificados arqueológicamente, y la sucesión de los estilos cerámicos en el mercado de arte del estado de Nueva York, definidos por los nombres de los ceramistas.

Es imposible resumir aquí todos los pasos de la demostración, que aplica el modelo con fina percepción de sus posibilidades, sus matices y sus límites. La idea de criticalidad opera como heurística de una clase particular de proceso dinámico, y no como una lectura servil, difusamente metafórica, de la cultura-como-montaña-de-arena. La conclusión a la que llegan Bentley y Maschner sugiere que la evolución cultural sería un fenómeno crítico auto-organizado. En base a las simples herramientas numéricas que se encuentran en los textos fundacionales de Bak y Sneppen, los autores adoptan como premisas:

(1) Que dicho modelo es apropiado para un caso que, como éste, concierne a agentes económicos interdependientes en una esfera de competencia en la que existe poco espacio para todos, dado que el número de consumidores potenciales es reducido.

(2) Que la distribución y el exponente de la ley de potencia del tiempo de vida de un estilo en el estado de Nueva York es consistente con el modelo de criticalidad auto-organizada.

(3) Que modelos alternativos, como el de Newman, que utilizan la ley de potencia sin referencia a las interconexiones entre los agentes, de hecho introducen el principio implícitamente.

Los autores argumentan que en el mercado de arte existe un constante proceso de prueba y error en el que se producen a veces estilos fallidos, de corta vida, que no llegan a constituirse en modas o tendencias; ellos creen que lo que se considera mérito artístico tiene menos que ver con el éxito que con la reputación, la cual podría entenderse, metafóricamente, como una mayor interconectividad. Bajo condiciones competitivas normales, parece inevitable que dominen unos pocos estilos. Puede que no sea posible prever con exactitud de qué estilo se va a tratar, pero sí puede asegurarse que a la larga un estilo surgirá como dominante. La continuación natural de estas investigaciones debería establecer qué procesos regulares gobiernan el surgimiento y la desaparición de estilos en determinado mercado. Hasta ahora, la investigación sugiere que los agentes que producen sus propios estilos operan en estado crítico, sujetos a avalanchas de todas las escalas, lo cual es un rasgo inherente a los fenómenos de criticalidad auto-organizada. Con los estilos cerámicos, este estado crítico se genera y mantiene a través de un proceso repetitivo de decisiones individuales que definen la retención o el rechazo de un estilo determinado.

Bentley y Maschner estiman que el potencial de esta línea de estudio para la arqueología es significativo. Ahora se pueden tratar de definir para las culturas arqueológicas las condiciones que prevén una distribución de ley de potencia en la popularidad de los estilos, aunque en sociedades no consumistas el "mercado" tenga otra significación. Este argumento otorga una nueva importancia a la interconectividad y al tamaño absoluto de las redes culturales. Podemos preguntarnos, por ejemplo, cuántos estilos en competencia puede haber en una sociedad, y de qué tamaño debe ser un mercado para que se presente un comportamiento crítico. ¿Ocurren las pequeñas avalanchas de cambio con más frecuencia en una región debido a que ésta se encuentra más interconectada? ¿Son los estilos de larga duración los que se vuelven más comunes? El modelo de evolución de Bak-Sneppes predice esos efectos.

Más aún, dado que ahora se sabe que los cambios ocurren de una manera puntuada, es posible que las fases arqueológicas discretas reflejen acontecimientos reales. Las puntuaciones

son producto de avalanchas de cambio que ocurren a través de la competencia de agentes. En la arqueología del futuro el gradualismo jugará un papel menos importante que el que ha venido jugando, y se espera que el concepto mismo de culturas en equilibrio se verá puesto en tela de juicio. Mediante el análisis de sistemas complejos se demuestra que la cultura está en constante estado de flujo, como producto de avalanchas imperceptibles pero continuas en la distribución de los rasgos. Cuando las avalanchas son grandes ocurren cascadas de cambios a través del sistema, algo que los arqueólogos designan como transiciones de fases, de las cuales se tuvo hasta ahora una comprensión no estructurada. Usos futuros de la teoría de la complejidad podrían llevar a una revisión de las "revoluciones" arqueológicas y de los abruptos cambios de estilo cuyas causas se atribuyen a factores externos como migraciones o desastres naturales, pero que tal vez sean en realidad fruto de la competencia entre agentes internos al sistema.

En sociología hay numerosos estudios que utilizan teoría del caos y dinámica no lineal que podrían ser inspiradores para la antropología sociocultural, y más puntualmente para el estudio cuantitativo o cualitativo de sociedades complejas. Una compilación de Raymond Eve, Sara Horsfall y Mary Lee (1997), representativa del pensamiento del grupo de la Universidad A&M de Texas, inaugura esa tendencia. Los trabajos compilados en ese texto incluyen usos ilustrativos de autómatas celulares, atractores extraños, trazas de recurrencia y mapas logísticos, así como una actitud ejemplar frente a los mitos posmodernos a propósito del caos. Es también recomendable el estudio de Roy Eidelson (1997), un psicólogo que examina la literatura con buen discernimiento y muestra su aplicabilidad a los sistemas sociales en tanto sistemas adaptativos. Una publicación periódica, *Emergence*, editada por el Institute for the Study of Coherence and Emergence ha estado disponible desde 1999 a través de Internet; su interés primario es la administración y la consultoría organizativa, pero cada tanto incluye artículos de teoría general.

En geografía humana y en ecología han aparecido numerosos estudios que examinan la expansión de las ciudades como fenómenos de criticalidad auto-organizada (Allen 1992) y desarrollan experiencias de modelado de patrones urbanos (Sanders 1996). Cada día que pasa los geógrafos comprueban que empleando criterios de criticalidad y métodos de cuenta de cajas (esto es, variación del valor conforme al tamaño de grilla), y proyectando los datos en un gráfico *log-log*, obtienen una línea recta que denota la naturaleza crítica y fractal de los fenómenos (Batty y Longley 1994). Su relevancia para los modelos de GIS parece ser clara, y es de esperar que los arqueólogos, al menos, adopten pronto esta práctica.

Capítulo aparte forman los estudios arqueológicos o antropológicos en los que juega un papel importante la ley de potencia. Recientemente, los israelíes S. Lev, Grigori Leitus y Sariel Shalev (2003) propusieron un método de datación de piezas arqueológicas de metal basado en ese principio. El método es aplicable a procesos de corrosión en los que la película protectora de óxido en la superficie de metal se encuentra controlada por fenómenos de estrés. La descripción de ese proceso parece corroborar el principio que rige las avalanchas en las pilas de arena. Dicen los autores que cuando la película de óxido alcanza cierto grosor se quiebra, de modo que la superficie de metal queda re-expuesta a la atmósfera. Se forma luego más óxido en contacto con el metal, y después de un período similar la capa de óxido vuelve a quebrarse y el proceso se repite. El resultado neto de esa conducta es la producción de una curva de oxidación que es virtualmente una línea recta. Esa curva se puede utilizar entonces para datar restos de objetos arqueológicos de plomo sepultados en suelos de pH

relativamente alto, tales como suelos carbonatados en los que el ritmo de corrosión es lento, de modo que sea posible promediar los tiempos sin desvirtuar la medición.

En otro orden de cosas, una de las fuentes primordiales en las exploraciones actuales de la teoría del caos en ciencias sociales es la compilación de Douglas Kiel y Euel Elliott (1997), de la Universidad de Texas en Dallas. Unos cuantos trabajos de esta colección son inusualmente sobrios y persuasivos, como los de los propios editores, el de Thad Brown (1997) y el de Harvey y Reed (1997). Estos últimos proporcionan una sistematización modélica que he reproducido con modificaciones en la tabla 3.3. El razonamiento más distintivo de Harvey y Reed tiene que ver con su caracterización de una forma nueva de modelado iconológico, propia de las ciencias del caos, como la que surge de los gráficos de la ecuación cuadrática, las bifurcaciones, las texturas, formas y movimientos de los autómatas celulares y, por supuesto, los paisajes catastróficos y los fractales (Harvey y Reed 1997: 318-319).

Jerarquía de complejidad ontológica	Estrategia de Modelado: Determinismo decreciente (eje horizontal) – Nivel de especificidad sistémica (eje vertical)					
Proceso II: Evolución social, modos de producción						
Proceso II: Lucha de clases. Conflictos hegemónicos						
12. Valores II: Cultura hegemónica, resistencia subcultural						
11. Valores I: Lucha de visión hegemónica vs subterránea						
10. Normas II: Poder relativo entre instituciones						
9. Normas I: Conformidad personal a estándares						
8. Roles II: Roles y recursos intra-organizacionales						
7. Roles I: Distribución de estímulos materiales y estima						
6. Facilidades II: División técnica del trabajo						
5. Facilidades I: Infraestructura sociotécnica						
4. Organización ecológica de tiempo y espacio institucional						
3. Organización ecológica de comunidad biótica local						
2. Evolución biológica como serie de bifurcaciones asistidas						
1. Regularidades determinantes del universo físico						
	Modelos predictivos	Modelos estadísticos	Modelos iconológicos	Modelos estructurales	Modelos ideales	Narrativas históricas
	Niveles de abstracción modélica					

Tabla 3.3 – Modelos de Harvey y Reed (1997)

La denominación ha sido tomada, como puede imaginarse, de las ideas del filósofo del arte Erwin Panofsky (1980). No creo que valga la pena discutir el resto de la tipificación o la asignación de las incumbencias temáticas a cada clase de modelos; así como está, la idea es más que sugerente e invita a pensar. Lo que importa destacar aquí es que Harvey y Reed no están solos en esta persuasión.

Efectivamente, el concepto guarda relación con una tesis implícita semejante que domina la obra de Stephen Wolfram (2002) en la que éste establece lo que él llama "una nueva clase de ciencia", una forma fascinante y polémica de indagación en la que se desarrollan y clasifican razonamientos gráficos como si de demostraciones matemáticas se tratara. La dimensión gráfica es sólo uno de los elementos que estas nuevas ciencias tienen para ofrecer, pero sin duda hay algo de verdad en la idea de su distintividad epistemológica. Las ciencias del caos y los sistemas emergentes despliegan una articulación icónica distinta a la de los paradigmas notacionales, simbólicos o discursivos. Dicen Harvey y Reed:

> Mientras los modelos predictivos y estadísticos están bien establecidos en las ciencias sociales, una tercera estrategia de modelado, el modelado iconológico, recién ahora está tomando cuerpo. Representa una ruptura epistemológica radical en el tipo de conocimiento que proporciona a los investigadores. La representación iconológica está basada en un método pictórico, en correspondencias visuales antes que en el razonamiento deductivo. … Las técnicas gráficas [derivadas de modelos matemáticos] asisten al investigador en el trazado visual de las trayectorias caóticas (Harvey y Reed 1997: 309-310).

También Kenneth Falconer (1999: 170), profesor de matemáticas puras y autor de uno de los mejores libros disponibles de dinámica no lineal, considera que los modelos gráficos, con sus atractores y bifurcaciones, permiten acceder a la comprensión de la conducta cualitativa de los sistemas dinámicos, enriqueciendo los métodos cuantitativos tradicionales. En sociología, Frederick Turner (1997: xxi) invita a descubrir una "nueva antología de formas reconocibles" cuya presencia observada acarrea implicancias verificables y sugiere una serie de hipótesis de trabajo, sea que se encuentren o no las figuras que constituyen signaturas de dimensiones fractales, atractores extraños, aperiodicidad o caos.

Los geógrafos Michael Batty, Philip Steadman y Yichun Xie (2004) han examinado esmeradamente la importancia de la visualización en las ciencias complejas, distinguiendo entre los modelos clásicos de visualización simbólica y los modelos icónicos que ahora son posibles gracias a la capacidad de representación de las computadoras. A medida que seamos más sensibles a los problemas de la complejidad en todos los sistemas, dicen, deberemos ser más cuidadosos en guardar las formas en el cumplimiento de los objetivos gemelos de parsimonia y verificabilidad; en este terreno, la visualización es primordial: las buenas teorías y modelos deben "lucir bien", independientemente de lo que valgan su lógica y sus estadísticas. La expresión gráfica ya no es colateral; por el contrario, la visualización está en el filo cortante de esta nueva forma de concebir la ciencia, a la cual hace no sólo más operativa sino también más comunicable. Los autores distinguen tres variedades distintas de visualización: (*a*) la que busca hacer las cosas más simples y explicables, (*b*) la que explora resultados imposibles de anticipar y refina procesos que interactúan de formas retorcidas o contraintuitivas, y (*c*) la que permite a los usuarios sin previo conocimiento técnico pero aguda comprensión del problema usar modelos para predicción, prescripción y control.

En la década de 1980 se desarrolló una técnica para el análisis de series temporales llamada traza de recurrencias (*recurrence plot*) que despliega armónicamente las tres variedades de visualización que luego identificaron los geógrafos del equipo de Batty (Eckman y otros 1987). La técnica se utiliza para detectar patrones escondidos en los datos temporales de sistemas disipativos no lineales, discernir similitudes entre secuencias cruzadas, evaluar la complejidad de una serie, identificar escenarios de caos o apreciar el efecto de las variables no consideradas; para ello se proyectan las series unidimensionales en espacios de fases de

más alta dimensionalidad, partiendo de la premisa de que todas las variables tienen algún impacto en el comportamiento secuencial de las variables restantes. Algunos programas de dominio público, como Visual Recurrence Analysis, implementan estas prestaciones con suma elegancia; todo lo que se requiere es ingresar los datos de la serie a través de archivos en modo texto. La idea subyacente a la traza de recurrencia es más cualitativa que numérica; el análisis de la traza genera patrones bidimensionales cuya semántica es tan rica como la de los atractores fractales. Aún sin conocimientos matemáticos, se pueden comprender las características dinámicas de un proceso o contrastar series de distinto carácter. Una secuencia al azar produce una traza uniforme; una señal determinista, un patrón estructurado. Existen cuatro clases de patrones a gran escala o *tipologías* que coinciden con las clases de universalidad que ya conocemos: homogéneos (en sistemas estacionarios y aleatorios), periódicos, con tendencia a la deriva y abruptos. En la pequeña escala hay *texturas* de puntos aislados, líneas verticales en los fenómenos intermitentes o finas diagonales que representan regiones visitadas con frecuencia. Cada rasgo está preñado de sentido para la interpretación visual de las trazas, un arte susceptible de aprenderse en pocas horas (Marwan 2003). Una investigación de Kevin Dooley y otros (1997: 265-267) muestra una interesante aplicación sociológica de la técnica, relativa a los procesos de cambio de la maternidad adolescente en el estado de Texas entre 1964 y 1990.

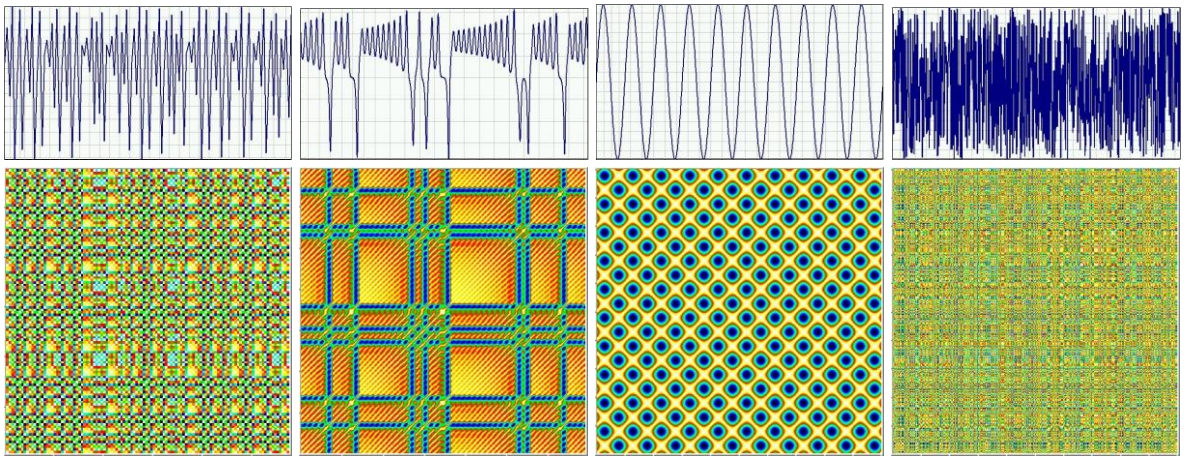


Fig. 4.5 – Trazas de recurrencia de ecuación logística, atractor de Lorenz, seno y ruido blanco

La figura 4.5 ilustra las imágenes resultantes de la traza de (*a*) la ecuación logística caótica con los mismos valores que utilicé para el ejemplo de la fig. 4.0d (k=3.8 y x_0=0.666666); (*b*) el atractor de Lorenz de la fig. 4.1, izquierda; (*c*) la función regular de seno y (*d*) una secuencia cualquiera de ruido blanco. En la parte superior he colocado los gráficos de estado correspondientes. El modelo de *plotting* puede tratar series cortas y es tolerante a ruido. Aunque ya hay antecedentes de aplicaciones en iconografía de arte religioso, economía, música, psicoterapia y ecología, todavía resta explorar intensivamente el uso de esta expresiva forma de visualización en ciencias sociales.

Desde Wiener a Batty, las teorías de sistemas han recorrido un largo camino en este proceso de expansión de la dimensión visual. La cibernética reposaba en el bucle pictórico de la realimentación, la TGS en diagramas de flujo, la teoría de catástrofes en vistas topológicas, la dinámica no lineal en trazas de recurrencia y atractores extraños; la geometría fractal será todavía más rica en recursos visuales, dando pie a una teoría de los paisajes y las formas complejas. Tal vez haya comenzado un momento ideográfico, antes que conceptual o cuan-

titativo. Lejos de que Occidente haya abusado de la dimensión visual desde Platón hasta la semana pasada (como lo quieren el antropólogo Stephen Tyler y otros posmodernos), todo indica que recién estamos aprendiendo a mirar, que todavía hay mucho por ver, y que en la mayoría de los casos regidos por la complejidad este régimen sensorial será, al menos por un tiempo, una parte fundamental de las prácticas.

Algo de este repertorio de ideas ya está llegando a la investigación empírica en arqueología y etnohistoria, al menos. En una compilación reciente, *Complex systems and archaeology* (Bentley y Maschner 2003) un puñado de investigadores de Inglaterra, Estados Unidos y Holanda aplica modelos de caos y complejidad a unas cuantas problemáticas arqueológicas:

- Alexander Bentley (2003), del Instituto de Arqueología del University College de Londres, estudia el crecimiento de redes y la desigualdad social en un puñado de sociedades reportadas en la bibliografía precedente en base a la independencia de escala y la ley de potencia. Su estudio, que denota un soberbio conocimiento de los formalismos de base y que enfatiza los factores diacrónicos, constituye un punto de partida óptimo para esta clase de análisis en etnohistoria. Particularmente esclarecedoras son las comparaciones entre distribuciones IE auténticas y otras que son log-normales o mixtas, así como su advertencia de que ambas, aunque puedan resultar parecidas, poseen propiedades antagónicas y son resultado de dinámicas muy distintas.
- En el artículo siguiente, Maschner y Bentley (2003) aplican los principios de redes IE y la distribución de ley de potencia al análisis del rango y las unidades domésticas a la prehistoria de las Aleutianas, proporcionando algunos ejemplos plausibles. La conclusión del estudio enfatiza adecuadamente que los datos y las técnicas ahora disponibles otorgan razón a la intuiciones del soviético Leo Klejn (1973); oponiéndose al pensamiento homeostático del entonces patriarca Lewis Binford, para quien el cambio sólo podía ocurrir como resultado de presiones desde el exterior del sistema, Klejn reivindicaba mucho antes que los arqueólogos norteamericanos comenzaran a hacerlo la importancia de las propiedades emergentes y la auto-organización en el crecimiento y transformación de las sociedades.
- Los documentos siguientes son algo más breves y programáticos; en ellos, los editores contemplan la posibilidad de estudiar fenómenos de cambio cultural como si fueran avalanchas de criticalidad auto-organizada; John Bintliff y James McGlade (2003) se ocupan de la relevancia del caos, la auto-organización y los atractores extraños para el modelado arqueológico, buscando escapar de los formatos deductivos tradicionales; Peter Bogucki (2003), de la Universidad de Princeton, reporta su estudio de los asentamientos neolíticos europeos como sistemas adaptativos complejos utilizando el programa Swarm del SFI; y Robert Layton, antropólogo de Durham, esboza algún vínculo entre los modelos basados en agentes y el "efecto mariposa" por un lado y los conceptos de agencia de Anthony Giddens y Pierre Bourdieu por el otro, desarrollando un breve ejemplo discursivo en el que un sistema permanece estable pese a los intentos de algunos agentes por generar diferencias de riqueza, mientras otro sistema se desestabiliza por las decisiones de unos pocos agentes. Sin modelos de caos, cuantificación ni agentes, Bateson había razonado lo mismo setenta años atrás en términos de esquismogénesis.

Los editores también advierten sobre el riesgo de adoptar la terminología del caos y la complejidad como un vocabulario de recambio que suplantará una narrativa maestra por otra pero dejará las cosas como estaban; si esto sucede, los objetos que tengan invariancia de es-

cala se llamarán "fractales", los eventos ocurrirán en "cascadas" y las cosas cuyo origen se ignore se atribuirán a "propiedades emergentes". Finalmente McGlade aporta una visión panorámica del estado actual del desarrollo metodológico y una propuesta de convergencia de epistemologías que suena algo componedora y ecléctica, pero que se torna más persuasiva cuando presenta las cosas, batesonianamente, en términos de mapas y territorios: "ningún mapa (modelo) es descriptor suficiente de un sistema complejo, … cada cartografía sirve a un propósito distinto" (McGlade 2003: 114).

En suma, las nuevas ideas están penetrando en nuestras disciplinas, aunque los resultados son aún poco impresionantes; la resistencia y la inercia que obstaculizan la adopción del marco complejo, conjeturo, se deben más a las experiencias fallidas con modelos anteriores y al sesgo intelectual de muchos profesionales que a cualquier otro factor. En un artículo disponible en Internet, "Chaos in Archaeology", admitidamente preliminar, el arqueólogo Joe McLeod-Iredale se planteaba en 1998 lo siguiente:

> Hay mucho *insight* a ganar de la aplicación de la teoría del caos a las ciencias sociales en general, pero se requerirá una estrategia por completo diferente para llegar a obtener beneficios. En los últimos veinte años, la arqueología se ha beneficiado mucho de los trabajos de los filósofos, pero a mi entender esta fertilización cruzada ya ha servido a su propósito y es tiempo de seguir adelante. La academia no está acostumbrada a las estrategias interdisciplinarias: la arqueología la hacen los arqueólogos, las matemáticas la hacen los matemáticos. Tal vez si los matemáticos pudieran pasar un poco de tiempo haciendo arqueología, y los arqueólogos pasaran un rato haciendo matemáticas, podríamos salir de esta ciénaga posmoderna e interpretativa antes que perdamos todo contacto con la realidad de la cual tratamos.

No es mucho más que esto lo que hay en el artículo de McLeod-Iredale, pero pienso que lo que expresa refleja con fidelidad un sentimiento que comienza a generalizarse.

4.3 – Medidas y definiciones de la complejidad

Las cosas pueden ser caóticas o no serlo; pero la complejidad es cuestión de grado y su límite inferior está en las cercanías de lo simple. Mientras el caos tiene que ver con estructuras de procesos y fenómenos no lineales, la complejidad se expresa muchas veces como una magnitud: lo primero a hacer con la complejidad es medirla. Ahora bien, hay diversos criterios y métodos para hacerlo. Para no dar lugar a una nueva clasificación, seguiré al geógrafo Steven Manson (2001) de la Universidad de Minnesota, quien propone tres enfoques distintos de la complejidad. El esquema de Manson es complementario a la forma en que he tratado los géneros complejos a lo largo de este texto, aunque la perspectiva que aquí se ha visto cubre una variedad más grande de epistemologías. La división de Manson distingue tres categorías envolventes:

- La primera es la *complejidad algorítmica*, en su doble vertiente de la teoría matemática de la complejidad y de la teoría de la información. En ambos casos la complejidad se identifica con la dificultad de definir matemáticamente las características del sistema.
- La segunda es la *complejidad determinista*, que asume la forma de una teoría del caos y la teoría de catástrofes, la cual afirma que la interacción de dos o tres variables puede generar que sistemas mayormente estables se vean sujetos a discontinuidades súbitas.
- La tercera es la *complejidad agregada*, que concierne a la forma en que los elementos individuales trabajan en concierto para crear sistemas con comportamientos complejos.

Claramente, la complejidad algorítmica es un concepto que no guarda relación alguna con la organización, y menos aún con la auto-organización; es una idea que se vincula con el azar y por tanto con modelos que son de neto orden estadístico. En el cuadro de los modelos, la complejidad algorítmica se situaría en el espacio de la complejidad desorganizada.

Superpuesta a esa clasificación de las formas posibles de la complejidad, se encuentra un repertorio extensísimo de medidas de la complejidad que no ha sido aún objeto de unificación y consenso. Por ejemplo, Murray Gell-Mann (quien prefiere hablar de pléctica en vez de complejidad) propuso una medida de complejidad efectiva, definiéndola como la longitud de la descripción mas concisa del conjunto de regularidades de una entidad (Gell-Mann 1995). Bajo este criterio, algo que sea casi completamente al azar, sin regularidades, tendrá una medida cercana a cero. Lo mismo sucederá con algo que sea totalmente ordenado. La complejidad efectiva sólo puede estar en la región intermedia entre el orden total y el desorden absoluto (p. 16). La complejidad efectiva es equivalente al contenido de información algorítmica del conjunto; lo que se mide es el contenido de información algorítmica de un modelo de una entidad, siendo este modelo un esquema en forma de algoritmo (las reglas de juego gramaticales) para especificar un conjunto de datos posibles. El inconveniente con esta clase de definiciones es que la complejidad de la descripción depende del nivel de análisis, del lenguaje utilizado y del conocimiento anterior. Como señala James Crutchfield, del SFI:

> En determinado lenguaje se puede describir las regularidades de manera compacta, en otro las regularidades se expresarán barrocamente. Cambien el lenguaje y las mismas regularidades requerirán más o menos descripción. De este modo, al no existir un conocimiento dado por Dios del lenguaje apropiado para afrontar la naturaleza, cualquier medida de la estructura en términos de la longitud de la descripción parecerá arbitraria (Crutchfield 1994: 5).

Otras medidas o criterios sugeridos de complejidad son el exponente de Lyapunov (que mide la sensibilidad de un sistema a sus condiciones iniciales según el número de dimensiones en el espacio de fases); la medida de Lyapunov de Kaplan y Yorke, basada en ese exponente (que evalúa la relación entre la dimensión fractal y otras características dinámicas); las magnitudes *K* y *N* de un modelo de redes booleanas aleatorias; el número de interacciones o interconexiones entre los componentes de un sistema; la magnitud de estabilidad en un modelo de grafos dirigidos; la profundidad lógica, estimada en tiempo de computación y su inversa, la cripticidad; el número de conexiones entre componentes en un modelo de red semántica; la conectividad global de un sistema medida a través de un Q-análisis modificado y la dinámica poliédrica; la magnitud de la entropía topológica; la auto-disimilitud como variación de las inferencias según el tamaño del espacio de búsqueda de información; la variación de los patrones espacio-temporales en los sistemas auto-similares; y por último las distribuciones y magnitudes propias del modelo del filo del caos, como el parámetro λ (Langton 1991; Kauffman 1991; 1993; 1995; Lewin 1992: 62; Merry 1995; Gell-Mann 1995; Wolpert y Macready 1997; Brown 1997; Degtiarev 2000). Unos pocos de estos conceptos, ligados a la complejidad caótica, se explican en otras secciones de este libro; al resto sólo los menciono para dar una idea de la pluralidad de ideas disponibles.

Seth Lloyd, del SFI, ha confeccionado una lista provisional de cuarenta y cinco medidas diferentes de la complejidad, que he compilado aquí agregándole los nombres de los investigadores que las han propuesto (Horgan 1998: 253). Nótese que la lista de Lloyd, con lo amplia que es, no incluye algunas de las medidas que ya he referido:

1) Información (Shannon)
2) Entropía (Gibbs y Boltzmann)
3) Complejidad algorítmica (Kolmogorov, Solomonoff)
4) Contenido de información algorítmica (Chaitin)
5) Información de Fischer
6) Entropía de Renyi
7) Longitud de código auto-delimitador (Huffman y Shannon-Fanon)
8) Longitud de código corrector de errores (Hamming)
9) Información de Chernoff
10) Longitud de descripción mínima (Rissanen)
11) Número de parámetros, o de grados de libertad, o de dimensiones
12) Complejidad de Lempel-Ziv
13) Información mutua máxima o capacidad de canal (Broomhead y Sidorov)
14) Información mutua algorítmica (Chaitin)
15) Correlación
16) Información almacenada (Shaw)
17) Información condicional (Chaitin)
18) Contenido de información algorítmica condicional (Chaitin)
19) Entropía métrica (Kolmogorov-Sinai)
20) Dimensión fractal (Mandelbrot) – Dimensión de Hausdorff-Besicovich
21) Dimensión de autosimilitud (Liu, Geiger, Kohn)
22) Complejidad estocástica (Rissanen)
23) Sofisticación (Koppel y Atlan)
24) Tamaño de máquina topológica (Crutchfield)
25) Complejidad efectiva o ideal (Gell-Mann)
26) Complejidad jerárquica (Simon)
27) Diversidad de subgráfico de árbol (Huberman y Hogg)
28) Complejidad homogénea (Teich y Mahler)
29) Complejidad computacional de tiempo
30) Complejidad computacional de espacio
31) Complejidad basada en la información (Traub)
32) Profundidad lógica (Bennett)
33) Profundidad termodinámica (Lloyd y Pagels)
34) Complejidad gramatical (jerarquía de Chomsky)
35) Información de Kullbach-Liebler
36) Distinguibilidad (Wooters, Caves y Fischer)
37) Distancia de Fischer (Wagner-Fischer)
38) Discriminalidad (Zee)
39) Distancia de información (Shannon)
40) Distancia de información algorítmica (Zurek)
41) Distancia de Hamming (R. W. Hamming)
42) Orden de largo alcance
43) Auto-organización (Turing)
44) Sistemas complejos adaptativos
45) Filo o borde del caos (Packard, Langton) – Distribuciones de ley de potencia-Zipf-Pareto

Otra muestra un poco más estructurada de definiciones y criterios ha sido elaborada por James Crutchfield (2003) en una charla en un simposio de retiro del SFI:

- Complejidades deterministas:
  - Complejidad algorítmica (Kolmogorov, Chaitin, Solomonoff, Martin-Lof, Levin)
  - Complejidad computacional (Blum, Cook, Hartmanis, Karp, Cook)
  - Medidas de alteatoriedad (Entropía termodinánica, tasa de entropía fuente, entropía métrica, Boltzmann, Shannon, Kolmogorov, Sinai)
  - Profundidad termodinánica (Pagels, Lloyd)
- Complejidades estadísticas
  - Complejidad aleatorizada (computacional): Cook, Karp
  - Teorética-informacional (convergencia de entropía e información mutua)
    - Entropía de exceso (Del Junco, Rahe, Crutchfield, Packard, Feldman, Debowski)
    - Información almacenada (Rothstein, Shaw)
    - Complejidad de medida efectiva (Grassberger, Lindgren, Nordahl)
    - Información reducida de Rényi (Szépfalusy, Györgyi, Csordas)
    - Complejidad (Bennett, Li, Arnol'd)
- Complejidad de lenguaje regular (Wolfram)
- Complejidad estructural (Crutchfield, Feldman, Shalizi, Young, Upper)
- Profundidad lógica (Bennett)
- Sofisticación (Atlan, Koppel)
- Complejidad efectiva (Gell-Mann, Lloyd)
- Complejidad gramatical (Auerback, Procaccia)
- Complejidad de grano grueso (Zhang)
- Complejidades de inferencia
  - Longitud mínima de mensaje (Boulton, Wallace)
  - Complejidad estocástica/predictiva, longitud de la descripción mínima (Rissanen, Dawid)
  - Criterio de información de Akaike/Boltzmann (Akaike)
  - Reconstrucción de ε-máquina (Crutchfield, Young)
  - Complejidad de cuello de botella (Bialek, Tischby, Neumenen)

Como puede verse, hay diversidad de criterios para medir la complejidad, lo que implica que hay importantes diferencias en las definiciones de la misma. No se trata simplemente de que hayan distintas unidades de medida o procedimientos de medición; esta abundancia trasunta más bien opiniones discordantes en cuanto a cuáles son los elementos diagnósticos que hacen que una entidad sea compleja y cómo debe ser la teoría capaz de tratar un objeto definido de esa manera. Es obvio que la ciencia se ha vuelto algo más complicada de lo que era cuando Claude Shannon proponía medir sumativamente la cantidad de información y con ese procedimiento acababa todo. También es más rica y diversificada de lo que pudo haber pensado Edgar Morin, quien se funda en un concepto de complejidad a la vez ambiguo y circunscripto, ligado a criterios de numerosidad, azar e indeterminación que remiten a nociones de termodinámica más propias del siglo XIX que del XXI (Morin 1984: 318-362).

En el libro que se está leyendo he optado por no definir monológicamente la complejidad, pues es evidente que su definición varía conforme a las teorías, las prácticas y las concepciones del mundo. Puede esperarse que haya al menos una definición explícita o implícita de la complejidad ligada a cada una de las técnicas propuestas para medirla, así como muchísimas más que no están asociadas a ningún método de cuantificación. Si se observan las listas, se comprobará que mientras unas pocas mediciones se refieren a sistemas reales, la abrumadora mayoría concierne a la conducta de los modelos antes que a la realidad misma. Ello ocasiona que ciertos autores consideren que no existen los sistemas o los fenómenos

complejos, sino que la complejidad es un efecto de la observación, una cualidad que se encuentra en el ojo del observador (Mikulecky 1995; 1999; Fioretti 1996; Rosen 2000b).

Noam Chomsky, sin embargo, definió un marco de jerarquías de la complejidad capaz de unir todo lo que se ha visto y lo que se verá en materia de teorías y algoritmos, aunque en definitiva su concepción engrane en una de las clases estipuladas por Crutchfield. En la década de 1950, Chomsky (1959) introdujo cuatro tipos de lenguajes formales, clasificados según las formas de producción permitidas por sus gramáticas. En la tabla siguiente, las letras mayúsculas representan símbolos no terminales que pueden ser expandidos, las minúsculas símbolos terminales y las letras griegas signos arbitrarios que pueden ser terminales o no. La jerarquía está compuesta por:

1) Gramáticas regulares (Tipo 3). Pueden consistir sólo de reglas de re-escritura de tipo $A \rightarrow b$, o $A \rightarrow bC$. Corresponden a los lenguajes y conjuntos que pueden ser tratados por autómatas deterministas de estado finito. Estos autómatas no tienen memoria. Reconocen o generan lenguajes regulares.

2) Gramáticas independientes de contexto (Tipo 2). Sólo tienen reglas de forma $A \rightarrow \alpha$, y por lo tanto no tienen restricción en cuanto a la forma que pueden tomar las reglas de producción de la derecha. Corresponden a los lenguajes y conjuntos que pueden ser tratados por autómatas no determinista de almacén o de *pushdown* (PDA). Estos autómatas tienen una memoria limitada y pueden, por ejemplo, llevar a cabo una comparación. Reconocen o generan lenguajes independientes del contexto.

3) Gramáticas sensibles al contexto (Tipo 1). Pueden tener reglas de forma $\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta$, donde γ no es un elemento vacío. Corresponden a los lenguajes y conjuntos que pueden ser tratados por autómatas ligados linealmente. Poseen una memoria auxiliar semi-infinita, proporcional a la cantidad de elementos que deben tratar. Reconocen o generan lenguajes sensibles al contexto.

4) Gramáticas irrestrictas (Tipo 0). Son idénticas a las anteriores, excepto por el hecho que γ puede ser nulo. Corresponden a los lenguajes y conjuntos susceptibles de ser tratados por máquinas de Turing. Poseen memoria irrestricta y pueden efectuar cualquier computación. Reconocen o generan lenguajes recursivamente enumerables.

Teniendo en cuenta esta jerarquía (y siendo que en teoría de autómatas un lenguaje y un problema son lo mismo), es posible establecer si una clase de objeto puede ser tratada por un tipo de máquina abstracta (Hopcroft y otros 2001: 33). Cuando los antropólogos Benjamin y Lore Colby (1981), por ejemplo, proponían una "gramática cultural" compuesta por reglas de re-escritura para producir los cuentos de los Ixil, incurrían en un error formal: como la gramática propuesta es propia de autómatas finitos (y éstos carecen de memoria) el protagonista de un cuento podía morirse en un episodio y seguir haciendo cosas en el siguiente; o se escapaba sin haber sido aprisionado, o se vengaba de quien nada le había hecho, o se casaba antes de nacer. Los relatos Ixil son fantasiosos, pero no llegan a tanto. La moraleja metodológica es que un autómata finito puede generar expresiones regulares o frases simples, pero no textos: no es lo suficientemente complejo.

La jerarquía de Chomsky se sitúa en un punto de articulación que vincula lo que en este libro y en antropología se entiende intuitivamente por complejidad y lo que los estudiosos de la complejidad algorítmica conciben bajo ese nombre. La jerarquía sirve para estructurar los distintos tipos de modelos con que comenzamos este libro, así como los algoritmos propios de los sistemas emergentes y los modos de producción de las formas fractales. La mayor parte de los fenómenos y procesos de la complejidad involucra modelos con capacidad de

computación universal. En ocasiones, y como se ha visto al tratar los sistemas dinámicos complejos y los procesos de criticalidad, esa capacidad es emergente de la interacción de agentes más elementales: un autómata celular completo puede llegar a ser una máquina de Turing; cada celda, en cambio, es un autómata finito. Todos los sistemas complejos examinados se pueden tratar según estos criterios, que algunos autores han hecho expresos (Siromoney y otros 1974; Smith 1984; Wolfram 1984; Prusinkiewicz y Lindenmayer 1990; Prusinkiewicz y Hanan 1998; Eglash 1999). Dado que Chomsky ha ofrecido tantas ideas a este campo, no será ésta la última vez que hagamos referencia a su pensamiento.

4.4 – La contienda entre el caos y la complejidad

"Si a usted le gustaba el caos, amará la complejidad", escribía Langdon Winner (1993). La narrativa más popular sostiene que la década de 1980 pertenece al caos y la siguiente a la complejidad; ésta sería entonces más nueva. Una historiografía un poco más escrupulosa, empero, encontraría que ya Warren Weaver (1948) y Ross Ashby (1947) hablaban de complejidad en la década de 1940, mientras que el caos recién aparecería tres décadas más tarde (Li y Yorke 1975), aunque quien acuñó la expresión "teoría del caos" fue nadie menos que Norbert Wiener (1938) en una de sus habituales anticipaciones.

La relación entre ambos espacios es de hecho muy complicada, los estudiosos se han estado mudando de un campo al otro, y no hay acuerdo en cuanto a dónde termina aquél y comienza éste. "El caos y la complejidad se persiguen mutuamente en círculo tratando de averiguar si son lo mismo o son distintos", reflexiona Chris Langton (Lewin 1999: 10). Aún dentro de cada disciplina hay desacuerdo: Stephen Wolfram, por ejemplo, considera que hacia mediados de la década de 1990 la predilección de las ciencias de la complejidad por asuntos sociales y biológicos difíciles de precisar le hizo perder crédito entre numerosos científicos (Wolfram 2002: 863). La afirmación es desconcertante, pues si sus autómatas celulares, sistemas complejos adaptativos por antonomasia, no forman parte de las teorías de la complejidad ¿en qué coordenadas disciplinarias se sitúan?

Un problema parecido se presenta cuando se trata de determinar si las teorías del caos y la geometría fractal pertenecen o no al canon de las teorías de la complejidad. Caos y fractales son ideas prodigiosamente convergentes, aunque unos pocos tipos fractales se salen de lo que estrictamente puede llamarse caos. Los fractales son la geometría del caos, como se ha dicho tantas veces (Briggs 1992). Ni duda cabe; pero ¿es toda complejidad caótica y/o fractal? La dinámica no lineal, que es uno de los espacios del conocimiento más rigurosos y respetados ¿a cuál de los dos (o tres) campos pertenece? ¿Es razonable hablar de pertenencias, en primer lugar? Estas preguntas son relevantes porque, aunque su fundamentación es débil y no es congruente con ninguna formulación matemática o computacional, algunos autores excluyen las teorías del caos y la geometría fractal de toda relación con las teorías de la complejidad o les asignan un valor subalterno.

Si tuviera que decidir por dónde pasan las líneas divisorias, yo diría que las teorías del caos abarcan los fractales y parte de la dinámica no lineal, mientras que las teorías de la complejidad incluyen a los sistemas con propiedades emergentes y a los sistemas complejos adaptativos (ACs, RBAs, AG, MBA); el problema es que los más interesantes de éstos son los que exhiben conducta caótica, atractores extraños y no linealidad. Hay zonas inciertas entre ambos espacios, por cierto; el más notorio concierne a los fenómenos de auto-organización, criticalidad y emergencia, algunas de cuyas sorprendentes estructuras complejas en la naturaleza se ilustran en la figura 4.6. Muchos de esos fenómenos, que cubren desde la física de las partículas de arena en médanos hasta los patrones de organización social, se pueden estudiar mediante autómatas celulares, modelos de agentes o de vida artificial (que quedarían del lado de la teoría de la complejidad) mientras que otros podrían simularse utilizando biomorfos o fractales de agregación limitada por difusión (que son propios de las teorías del caos). Ninguno de los formidables estudios contemporáneos de auto-organización, empero, establece diferencias taxativas en cuanto a la pertenencia de las ideas a uno u otro campo, porque está claro que las clases de universalidad que vinculan patrones de distinta materia-

lidad son, por definición, de incumbencia transdisciplinaria (Flake 1999; Ball 2001; Shalizi 2001b; Camazine y otros 2003; Kubik 2003). En definitiva, las teorías de la complejidad y las teorías del caos cubren más o menos el mismo territorio, y las escaramuzas que algunos espíritus belicosos han promovido entre ellas carecen a mi juicio de interés científico y sustancia conceptual.

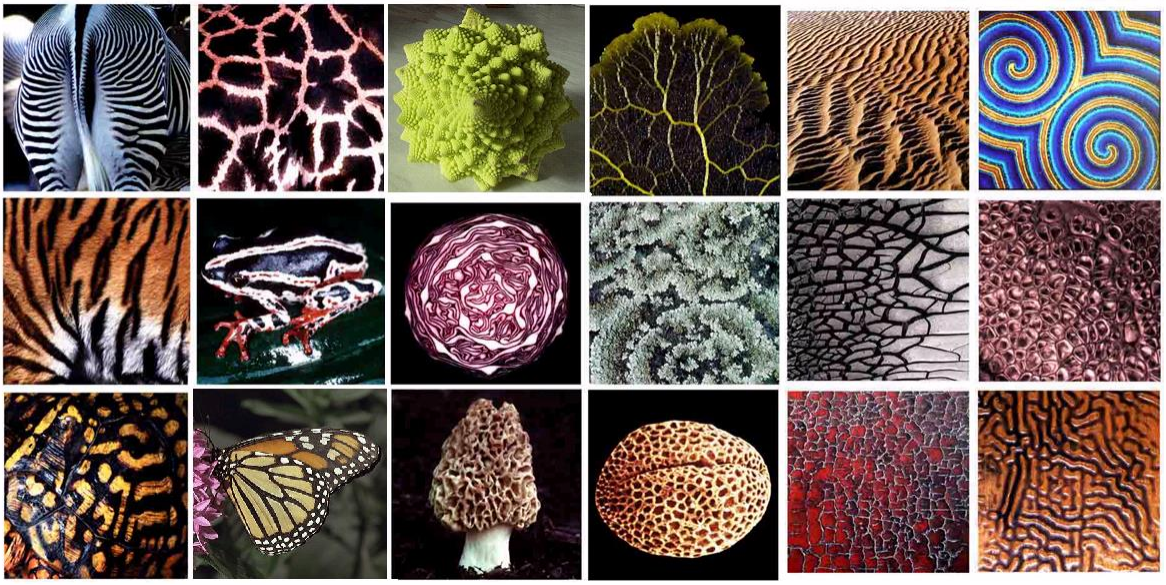


Fig. 4.6 – Patrones de auto-organización en la naturaleza

Más allá de las contiendas, el terreno mejor establecido será siempre el de la dinámica no lineal, que permanecerá como un logro vital cuando las marcas de fábrica de la ciencia de la complejidad y la ciencia del caos sean un recuerdo lejano. Si ha habido un cambio paradigmático, éste se vincula al reconocimiento de que los procesos reales relevantes para cualquier ciencia decididamente no son lineales. Arthur Fischer (1985), de la Universidad de Santa Cruz en California, alega que los movimientos no lineales constituyen la clase de cosas más común en el universo. James Murray (1991), especialista reconocido en biología matemática, a su vez, afirma que "si un modelo matemático de cualquier fenómeno biológico es lineal, es con certeza irrelevante desde el punto de vista biológico". Una de las figuras mayores en ecuaciones integrables, Athanassios Fokas (1991), dice: "Las leyes que gobiernan la mayor parte de los fenómenos que se pueden estudiar en las ciencias físicas, la ingeniería y las ciencias sociales son, por supuesto, no lineales". Más radicalmente, Foster Morrison (1988) asegura que "los sistemas lineales no existen en la naturaleza"; David Campbell, James Crutchfield y otros (1985) objetan incluso el término no-lineal, pues implica que las relaciones lineales son la norma.

En cuanto a la relación entre complejidad por un lado y caos y geometría fractal por el otro, la postura del filósofo pos-estructuralista Paul Cilliers (1998) es una de las más excluyentes que conozco. Él define los sistemas complejos según criterios de criticalidad auto-organizada, número elevado de variables, interacciones no lineales y propiedades emergentes de las interacciones. Expulsa luego del ámbito de la complejidad a la teoría del caos y a la geometría fractal (pues para él los objetos fractales serían complicados pero no complejos). En consecuencia, en su especificación teórica las condiciones iniciales no son relevantes, como sí lo son en casi todas las formulaciones del caos. La separación que hace Cilliers entre las

teorías del caos y la complejidad no es convincente, lo que ha sido ya señalado por David Spurrett (1999b). Al excluir caos y fractales por razones que remiten más a su conveniencia ideológica que a la necesidad técnica, la complejidad de Cilliers carece de atractores extraños, bifurcaciones, aperiodicidad, constante de Feigenbaum, recursividad, patrones de distribución (Zipf, Pareto, ley de potencia, independencia de escala, series de Fibonacci), clases de universalidad y dimensiones no enteras. Lo que queda no parece muy complejo que digamos.

Otros autores también separan la ciencia de la complejidad de la ciencia del caos, pero ni siquiera se ponen de acuerdo en cuanto a cuál vino primero o cuál llegó más tarde a la ronda de las modas intelectuales. Uno de los separatistas más radicales es Don Mikulecky, de la Virginia Commonwealth University, quien afirma que

> Nada de lo que ha revelado la caótica se encuentra fuera del paradigma newtoniano. Ella meramente exploró los límites de la dinámica no-lineal que yacen en el corazón del formalismo. La complejidad [en cambio] desafía ese formalismo, porque por su propia naturaleza, no se puede ver desde su interior. Requiere una visión desde fuera (Mikulecky 1999: 3).

A mitad de camino de la política de exclusión de Cilliers-Mikulecky y de la definición integrativa de Brown se encuentra la postura de Prigogine, quien establece que la complejidad físico-química no debe ser identificada por completo con la complejidad algorítmica de Chaitin-Kolmogorov; que no cabe hablar en rigor de sistemas complejos, sino de comportamiento complejo; que sólo en sistemas disipativos pueden existir atractores; que en estos sistemas existen atractores periódicos, cuasi-periódicos y también no periódicos, identificables con los fractales; que en ciertas condiciones los sistemas disipativos pueden dar lugar a atractores caóticos si se varían ciertos parámetros de control; que el comportamiento caótico se puede presentar incluso en sistemas dinámicos de muy pocas variables (este es el efecto de "ala de mariposa" descubierto en 1963 por Edward Lorenz); y que no existe una propensión intrínseca a los enormes sistemas multivariados de precipitarse en el caos, el cual puede aparecer también en otras circunstancias (Lorenz 1995: 12; Nicolis y Prigogine 1989). En otras palabras, el caos determinista es uno de los casos posibles de comportamiento complejo, y forma parte de las manifestaciones más representativas de la complejidad, aunque existan complejidades no caóticas. A pesar de aborrecer a Prigogine, Per Bak (1996: 29-31) coincide con él al identificar caos con ruido blanco o con el azar amorfo, lo que trae aparejado que deba mantener separados el caos (que no le atrae) y los fractales (que le apasionan).

En coincidencia con la visión de Nicolis y Prigogine, los politólogos Douglas Kiel y Euel Elliott, de la Universidad de Texas en Dallas, piensan que la teoría del caos es sólo un territorio parcial, aunque importante, en el ámbito de los sistemas alejados del equilibrio. La teoría del caos posee mayor implicancia en lo que respecta a derivar comportamientos complejos a partir de relaciones simples, tratar inestabilidades y determinaciones estructurales particulares, y examinar limitaciones y posibilidades específicas en materia de predecibilidad (Kiel y Elliott 1997: 10). En el otro extremo, Robert Axelrod, profesor de ciencias políticas de la Universidad de Michigan, identifica la teoría de la complejidad con el estudio de las interacciones de agentes o actores, realizado mediante simulaciones de computación *down to top* en tecnología de modelado basado en agentes, combinado con algoritmos genéticos (Axelrod 1997: 3, 7). En la perspectiva de Axelrod no hay referencias importantes a la teoría del caos ni a los autómatas celulares.

Algunos aseguran que tanto el caos como la complejidad son etapas superadas en la progresión de ciencias grandiosas que sobrevienen a razón de una por década, que siempre ostentan nombres ominosos que empiezan con "c" y que, como la cibernética en los 60s y la teoría de catástrofes en los 70s, acaban sobrevendiéndose y prometiendo más de lo que pueden entregar. Una vez que se pasan de moda, todo el mundo se ríe de ellas y retorna a su reduccionismo favorito. Se dice que los movimientos que están ahora en boga son o bien "la nueva clase de ciencia" de Wolfram (2002), o la "nueva ciencia de las redes" (Barabási 2003: 227-229; Watts 2004), la nueva ciencia de la auto-organización y la emergencia (Holland 1998; Johnson 2003; Camazine y otros 2003), o "sync", la "nueva ciencia del orden espontáneo" (Strogatz 2003: 285-286); pero esta historiografía luce autocelebratoria, de pequeña escala y escasa profundidad temporal.

Todavía está por escribirse una buena historia del campo, como quiera que se lo organice. Hasta la fecha, el ejercicio de clarificación histórica más escrupuloso y documentado es el de David Aubin y Amy Dahan Dalmedico (2002), de la Universidad Pierre y Marie Curie de París. Después de estudiar el desenvolvimiento de la dinámica no lineal desde Poincaré hasta la actualidad, prestando atención a las contribuciones de las escuelas francesa y soviética, los autores encuentran que el marco mayor de *longue durée* es el de la teoría de los sistemas dinámicos y que el estudio del caos fue sólo un momento especial, caracterizado por un espíritu de arrebato que en la actualidad se está aplacando. El caos tuvo su momento de apogeo en las dos últimas décadas del siglo XX, a caballo de las formidables posibilidades computacionales, de un glosario estridente (atractores extraños, efecto mariposa, juego del caos, filo del caos) y de una literatura de divulgación cuya pedagogía simplificó, esencializó y dramatizó los acontecimientos. Aubin y Dahan piensan que en los días que corren la ciencia del caos propiamente dicha ya no existe; su lugar ha sido tomado por una transdisciplina que puede identificarse con las ciencias de la complejidad, que están clamando por ocupar la plaza vacante. Como sea, dicen, después del caos nada volverá a ser lo mismo; sus ideas ya se han transformado en un lugar común: encarnaron una transición que fue tanto efímera como irreversible.

La disputa entre los proponentes de la teoría del caos y la de los teóricos de los sistemas dinámicos complejos está lejos de haber quedado zanjada. En alguna medida se trata también de una querella entre instituciones, con el SFI y el LANL en un bando y el Centro Prigogine de Austin en el otro. Los complejistas acusan a los caólogos de reintroducir el reduccionismo por la puerta trasera, de preferir la simulación computacional a la comprensión de la realidad, y de operar con sistemas cerrados; éstos responden con acusaciones de mixtificación y seudociencia, y les imputan no haber definido su objeto, o confundir complejidad con simple azar (Heylighen 1993; Horgan 1996; Back 1997; Eglash s/f; Rosen 2000b; Mikulecky 1995; 1999; Shalizi 2001a).

Tampoco en el seno de cada grupo reina la armonía; Per Bak asegura que los autómatas celulares de Wolfram del tipo IV no puede producir comportamientos complejos, y expertos de Chicago le responden diciendo que él ni siquiera ha descripto adecuadamente las montañas de arena, o que para salvar la teoría hay que reemplazar la arena por arroz (Bak 1996: 107; Horgan 1998: 264; Boccara 2004: 343). Algunos miembros del SFI que orbitan en torno a John Holland, encabezados por Melanie Mitchell, James Crutchfield y Peter Hraber (1993), se han alzado en rebelión contra el filo del caos. El propio Robert May (1987) duda que el ruido ambiental permita encontrar caos auténtico en sistemas físicos, biológicos o so-

ciales fuera del laboratorio. Otros especialistas han restado crédito a la teoría de Kauffman sobre el número de atractores que surgen en una red booleana, otros no han encontrado ruido 1/*f* en los fenómenos de criticalidad, y otros más han objetado la "nueva clase de ciencia" que propusiera Stephen Wolfram (2002) en un libraco de 1400 páginas en el que no se menciona ningún otro texto (Weinberg 2002). Todos los aportes de las teorías del caos y la complejidad han sido puestos en tela de juicio o relativizados por estudios de casos intensivos, demasiado numerosos para citarlos aquí. Los más afectados por dudas y pruebas negativas han sido el filo del caos, la distribución de ley de potencia, la criticalidad auto-organizada y las redes independientes de escala. Los estudios de verificación han impuesto condiciones adicionales a los modelos originales para mantener su conformidad con ciertos hechos, o han obligado a subdividir clases de universalidad mayores en otras más acotadas. Pero hay que decir que, en general, ésos y otros aportes tratados en este libro han soportado la prueba empírica con razonable desempeño; algunos de quienes cuestionaron al caos o a los fractales, como George Papanicolaou o Michel Baranger, han cambiado de idea con el tiempo.

También en el terreno fractal hay luchas intestinas, como las que confrontan al determinista Michael Barnsley con el aleatorista Benoît Mandelbrot (Monroy Olivares 2002: 270-273). A aquél se lo ha acusado de fraude por exagerar la capacidad de los sistemas de funciones iteradas para comprimir información, y a éste de plagio por usar multifractales para predecir el comportamiento a largo plazo de los índices financieros (Mandelbrot 1999). Cuanto mejor parece una propuesta, más se la combate. Como se ha dicho, es más probable que un científico utilice un cepillo de dientes ajeno que la nomenclatura o las ideas de otro científico (Gell-Mann 1995). Estos "elementos centrífugos y territoriales" (Turner 1997: xii) tal vez reflejen choques de personalidad o sectarismos doctrinarios, pero su frecuencia e intensidad son también sintomáticas del carácter inherentemente polifónico de todo el paradigma; las controversias endémicas, los conatos de pruebas negativas y los desdoblamientos de clases que atraviesan el movimiento marcan un rudo contraste con la ortodoxia, la repetición mecánica de consignas, el culto al genio y el conformismo que caracterizan a las corrientes autopoiéticas y constructivistas.

Aunque estos espacios se solapan y se interpenetran por todas partes, puede decirse que las teorías y prácticas en torno al caos, sumadas a las herramientas de sistemas complejos adaptativos (desde los autómatas celulares hasta el algoritmo genético), parecen por el momento las más homogéneas e instrumentales para la investigación sociocultural. Existe también un camino transdisciplinar que pasa por las teorías de fenómenos críticos, transiciones de fase y clases universales que recién se está comenzando a examinar (Sornette 2000). La teoría de la complejidad establecida en torno de los sistemas alejados del equilibrio, mientras tanto, aún no ha logrado forjar instrumentos y cada tanto se precipita, sobre todo en sus elaboraciones secundarias, en el reparto selectivo de elogios y denuestos, en la voluptuosidad verbal de la galaxia-complejidad o en las tinieblas del constructivismo. No hay por ahí entonces una teoría que sea al mismo tiempo completa, grande y buena. Recomendando no olvidar lo que ahora se sabe acerca de la complejidad, mi sugerencia es que en esta circunstancia la teoría debe ser definida disciplinariamente y correr por cuenta del investigador, como en los buenos viejos tiempos.

4.5 – Teorías del caos y posmodernismo

Las teorías del caos se han convertido en una especie de pantalla proyectiva de posturas ideológicas diversas donde todo el mundo es capaz de interpretar los sentidos que más le placen. Estas visiones no se originan en su abstrusa matemática, a cuyas cercanías los filósofos e intelectuales casi nunca llegan, sino en la lectura entrópica que los posmodernos han hecho de sus intermediarios de divulgación: James Gleick (1987), periodista del *New York Times* y autor del best seller *Chaos*; Krysztof Pomian (1978), en el papel de descifrador de la teoría de catástrofes; Harmke Kamminga (1990), responsable de enseñarle a los lectores de izquierda "qué es esa cosa llamada caos". No afirmo que esas divulgaciones no sean aptas, pero considero que un filósofo que esté instando a sus lectores a embarcarse en revueltas epistemológicas radicales debería hacer un esfuerzo un poco más digno y tomar contacto con la ciencia real, pues el prerrequisito de la enseñanza es aprender primero. Se hace necesaria entonces una crítica, y de allí este capítulo; lo que sigue no es una impugnación del posmodernismo (del cual ya no me interesa si tiene o no razón), sino un examen de los argumentos que alegan que las nuevas ciencias respaldan la visión posmoderna de las cosas.

Mientras que los posmodernos sostienen que las ciencias y las matemáticas en general son detestables, con las ciencias y las matemáticas del caos están dispuestos a hacer una excepción, pues sin duda piensan que ellas les proporcionan buenos fundamentos contra la racionalidad. No se tratará de la única indulgencia, por cierto, ya que en su búsqueda de argumentos ventajosos recuperarán también nada menos que al evolucionismo (sobre todo en versión de Lamarck), y a los formalismos de autómatas celulares y redes neuronales. El evolucionismo permite a los posmodernos contraponer las estrategias auto-organizadoras de la vida a las reducciones y a la linealidad del pensamiento mecanicista; los formalismos, por su parte, les brindan una referencia de apoyo en su cruzada contra la lógica como modelo del pensamiento humano, y les permiten creer que ha sido posible modelar la autopoiesis, aunque ésta haya demostrado ser incomputable. Los posmodernos que se tomaron el trabajo de averiguar de qué se trata se han sumado, en efecto, al bando conexionista (Ibáñez 1990; Varela 1990; Kosko 1995; Devlin 1997; Cilliers 1998).

El hecho es que el posmodernismo ha querido asociarse a las epistemologías complejas desde sus comienzos. La primera manifestación que expresa el anhelo de alianza entre posmodernismo y teorías del caos se encuentra en *La condición posmoderna* de Jean-François Lyotard (1986), que es nada menos que el texto que define en forma arquetípica la naturaleza de ese movimiento. Todo un capítulo del breve opúsculo de Lyotard define "la ciencia posmoderna como investigación de inestabilidades". Como podría esperarse, esta ciencia consagra apologías a la teoría cuántica, la relatividad, la teoría de catástrofes, la geometría fractal, el teorema de Gödel, la teoría de juegos, la teoría de los sistemas alejados del equilibrio y hasta la teoría batesoniana del doble vínculo de la escuela de Palo Alto. Extrañas piezas, formidables por separado pero irregulares en su conjunto, referidas a distintos niveles de tipificación y a diferentes realidades, y ocasionalmente incompatibles.

Pero Lyotard no integra sino que yuxtapone. El párrafo más exultante que encapsula su postura frente a las teorías de la complejidad sin duda es este:

> [L]a preminencia de la función continua derivable como paradigma del conocimiento y de la previsión está camino de desaparecer. Interesándose por los indecidibles, los límites de la precisión del control, los cuanta, los conflictos de información no completa, los *fracta*, las catástrofes, las paradojas pragmáticas, la ciencia posmoderna hace la teoría de su propia e-

> volución como discontinua, catastrófica, no rectificable, paradójica. Cambia el sentido de la palabra saber, y dice cómo puede tener lugar ese cambio. Produce no lo conocido, sino lo desconocido. Y sugiere un modelo de legitimación que en absoluto es el de la mejor actuación, sino el de la diferencia comprendida como paralogía (Lyotard 1986: 107-108).

Dejando de lado que resulte difícil de justificar una ciencia que produzca desconocimiento en lugar de saber y a la que no le preocupe rectificarse, y que una expresión como "la diferencia comprendida como paralogía" sea una frase cómplice sin sentido aparente, las apostillas prodigadas por Lyotard testimonian lecturas apresuradas de textos de divulgación antes que de los documentos que desenvuelven los fundamentos profundos de las teorías. En cada argumento, en cada gesto pedagógico, se percibe la falta de una comprensión categórica de las ideas primordiales. A propósito de la teoría de catástrofes de Thom, por ejemplo, la prueba física de la insustancialidad de sus lecturas es tan patente que resulta embarazosa. Primero que nada, Lyotard recomienda un texto de Krzystof Pomian, al cual encomia como "una exposición accesible al profano de la teoría de catástrofes" (p. 106). Este paternalismo encubre su propia inexperiencia: el libro fundamental de Thom, *Estabilidad estructural y morfogénesis*, prohibitivamente difícil, es mencionado alguna que otra vez pero siempre a partir de citas de Pomian, nunca en forma directa (p. 106, 107).

Al aconsejar a los inexpertos, Lyotard tergiversa el significado mismo de la teoría de catástrofes y el objetivo que se propuso Thom al desarrollarla. Ignora que buena parte de la topología de los espacios de función de Thom y sus bellos paisajes catastróficos se basan en los correlatos gráficos de las funciones derivables continuas, a las que Lyotard había decretado, como vimos, "en camino de desaparecer" (Thom 1997: 52 y ss; Sokal y Bricmont 1999: 141; Gross y Levitt 1994: 267 n. 15). También pasa por alto el hecho de que Thom estimaba que en las ciencias humanas se tropieza con una noción de forma distinta a la de las ciencias naturales, "lo cual hace extremadamente delicado el establecimiento de modelos *via* teoría de las catástrofes en estas disciplinas" (Thom 1985: 88); el proyecto de Thom más bien consistía en antropomorfizar la noción de morfogénesis presente en los fenómenos naturales, antes que en facilitar a las humanidades conceptos de las matemáticas puras (Thom 1997: 337).

Como ya puede intuirse, los deslices técnicos de Lyotard son demasiado profusos para tratarlos aquí uno a uno, por lo que tomaré en consideración sólo una adulteración particular a modo de muestra representativa. Lyotard considera miembros de un mismo conjunto a la teoría de catástrofes y a la geometría fractal. Eso no es en sí condenable, pues podrían encontrarse puntos en común entre ambas si se busca un poco (como se sabe después de Cantor, siempre se puede hacer que dos cosas cualesquiera sean miembros de una misma clase); el problema radica en cuáles son las homologías que Lyotard les atribuye y la forma en que las caracteriza. Tras describir a grandes rasgos las observaciones de Mandelbrot sobre la curva de Koch, en el sentido de que una curva tal posee un número de dimensiones entre 1 y 2, intermediaria entre una línea y una superficie, Lyotard escribe:

> Los trabajos de René Thom van en un sentido análogo. Interrogan directamente la noción de sistema estable, que se presupone en el determinismo laplaciano e incluso posibilista (Lyotard 1986: 106).

Los dos signos de puntuación de esta cita separan tres ideas que son objetivamente inexactas. El trabajo de Thom no guarda tantas correspondencias con la geometría fractal como para decir que ambas van en un mismo sentido; las catástrofes no son fractales, los fractales

no son catastróficos. Thom tampoco "interroga" la noción de sistema estable como tal, sino que más bien modela distintas inestabilidades que todos los científicos, incluso Laplace, sabían existentes. Si Thom dedica varias páginas a discutir los sistemas estables, no es jamás para poner en tela de juicio la validez del determinismo; como ya hemos visto y seguiremos viendo, la idea es exactamente la contraria. Ningún fractal puede tampoco poner en peligro el determinismo, ni confirmarlo; pienso que el problema aquí es la creencia (errónea) de que el caos sólo se manifiesta en condiciones de indeterminación: el caos, por el contrario, se manifiesta *típicamente* en escenarios deterministas (Nicolis y Prigogine 1989: passim; Schuster 1984; Poincaré 1909; Spurrett 1999a). Las ciencias del caos constituyen un intento para avanzar el conocimiento hacia condiciones de complejidad; no sólo no cuestionan el determinismo, sino que lo extienden hacia regiones antes dominadas por el azar.

Ninguno de los modelos de catástrofes que puedan dibujarse incluye o representa curvas, superficies, volúmenes o hipervolúmenes homotéticos (autosimilares). No hay dimensiones fraccionales en la teoría de catástrofes. En el libro canónico de Thom no hay tampoco la más mínima referencia al caos, a excepción de una referencia al pasar a los atractores de Lorenz, sólo para decir que "sea ello lo que fuere, nosotros sólo consideraremos después atractores de tipo simple, como puntos aislados o trayectorias cerradas ordinarias en las que la propiedad de estabilidad es inmediata" (Thom 1997: 62). Los únicos atractores en los que Thom repara, entonces, no son los atractores extraños de los fractales, sino los de punto fijo, ya que las catástrofes son, por definición, bifurcaciones entre diferentes estados de equilibrio.

Si hay alguna analogía entre la geometría fractal, la teoría del caos y la teoría de catástrofes es que todas ellas están alentadas por una visión determinista. Aunque Lyotard adjudica a todas ellas un espíritu irracional, es incuestionable que la investigación de Thom sólo trata de precisar los límites y dificultades del determinismo a fin de que éste se nutra de un sentido epistémico más riguroso. Thom ha sido rotundo al respecto:

> Una visión del mundo sin causalidad me parece totalmente sin sentido. Ciertos físicos fundamentalistas sueñan con ella y quizá sea posible en ciertos dominios, pero desde luego no en el mundo macroscrópico, no a nuestra escala (Thom 1992: 71).

Ante quienes promueven principios de multiplicidad, complejidad, desorden, azar, cambio y ruido, Thom opone una epistemología que acentúa la unidad, la simplicidad, el orden, el determinismo y la permanencia. Y para que sea más transparente su postura, organiza la antinomia en un diagrama (Thom 1991: 68). También se opone fervientemente a esa

> … escuela de epistemología contemporánea [que] pretende que el mundo de las antiguas verdades de la ciencia clásica ha muerto, que el determinismo 'laplaciano' ha vivido ya demasiado, y que se abre la hora de una *scienza nouva* en la cual podrá florecer la innovación, en la cual el libre albedrío del hombre podrá expansionarse a su gusto lejos de las restricciones obsoletas del determinismo mecanicista. … Los partidarios de la novedad han creído necesario atacar al determinismo para permitir la innovación. [Pero] las debilidades del determinismo son más que nada debilidades de nuestra imaginación. Nada nos permite afirmar que estas debilidades sean definitivas (Thom 1992: 63, 64, 68).

Como si los estuviera respondiendo, la expresión de Thom constituye un desmentido frontal, punto por punto, a los términos en los que Lyotard caracteriza su epistemología.

Está claro entonces que el régimen de lectura de Lyotard le ha precipitado en tipificaciones incorrectas de la naturaleza epistemológica de las ciencias del caos, así como en interpreta-

ciones literales de los nombres de las categorías técnicas que llevan muy lejos de su sentido formal. El ejemplo más grotesco de esto último acaso sea la referencia encomiástica a la teoría de los juegos, una compleja abstracción matemática de John von Neumann, que Lyotard confunde con una filosofía lúdica de la realidad, una táctica social partisana y antiautoritaria, "útil en el sentido de que da nacimiento a ideas" (Lyotard 1986: 39, 108). Ni la teoría de los juegos como teoría ni von Neumann como persona tienen que ver con ese espíritu; la teoría es más bien un modelo adusto de combinatorias y tomas de decisiones racionales en función del principio de *minimax,* y por ello fue integrada alguna vez al paquete eficientista de la *Operation Research*; su autor fue uno de los halcones que pensaban que una guerra nuclear preventiva no estaría del todo mal. Aunque la teoría de los juegos es abstracta, como he dicho, las ideas a las que puede dar nacimiento tendrían que ver más con la lógica corporativa, la perpetuación del equilibrio y el *status quo* que con los desafíos épicos al orden establecido.

Pese a que su semblanza de la ciencia de la complejidad es tan rudimentaria como se ha visto, una vez que Lyotard homologó fractales y catástrofes como metáforas apropiadas para explorar la condición posmoderna, la idea se contagió a diversos intelectuales que estaban a la caza de una fundamentación cualquiera y de un estímulo para su fantasía. Es imposible revisar todos los casos en que esto sucedió. Los mismos mandatos y el mismo tono se encuentran en Jean Baudrillard (1992), en Gilles Deleuze y en Félix Guattari (Deleuze y Guattari 1991; Guattari 1992), para no mencionar sino a autores renombrados. Seleccionaré tres ejemplares de frases particularmente exaltadas para que el lector aprecie su estilo argumentativo, colmado de interpretaciones que no por su dominio del dialecto lacaniano dejan de ser tan desatinadas como las de Lyotard. El primero es Baudrillard:

> Nuestros sistemas complejos, metastáticos, virales, consagrados exclusivamente a la dimensión exponencial (tanto si se trata de la inestabilidad como de la estabilidad exponenciales), a la excentricidad y a la escisiparidad fractal indefinida, no pueden ya tener un final. Entregados a un intenso metabolismo, a una intensa metástasis interna, se agotan en sí mismos y dejan de tener destino, final, alteridad, fatalidad. Están condenados a la epidemia, a las excrecencias sin fin de lo fractal, y no a la reversibilidad y a la resolución perfecta de lo fatal. Sólo conocemos los signos de la catástrofe, no conocemos ya los signos del destino. (Por lo demás, la teoría del caos, ¿se ha ocupado del fenómeno inverso, asimismo extraordinario, de la *hiposensibilidad* a las condiciones iniciales, de la exponencialidad inversa de los efectos en relación a las causas, de los huracanes potenciales que acaban en un batir de alas de mariposa?) (Baudrillard 1992: 160).

Ahora Deleuze y Guattari:

> … la primera diferencia entre la ciencia y la filosofía estriba en sus actitudes respectivas frente al caos. El caos se define más por la infinita velocidad con la que se disipa toda la forma que se constituye, que por su desorden. Es un vacío que no equivale a la nada, sino a un virtual que contiene todas las partículas posibles y extrae todas las formas posibles que surgen para volver a desaparecer de inmediato, sin consistencia, sin referencia y sin consecuencia. Es una velocidad infinita de nacimiento y desvanecimiento (Deleuze y Guattari 1991: 147).

Y finalmente Félix Guattari, en una apoteosis de sinsentido como las que abundan en su *Chaosmose*:

> Una disposición maquinal, a través de sus diversos componentes, arranca su consistencia franqueando umbrales ontológicos, umbrales no lineales de irreversibilidad, umbrales crea-

> tivos ontogenéticos y de autopoiesis. Aquí se debería ampliar la noción de escala para poder pensar las simetrías fractales en términos ontológicos. Lo que atraviesan las máquinas fractales son escalas sustanciales. Las atraviesan a la vez que las engendran. Pero –hay que reconocerlo– estas ordenadas existenciales que "inventan" siempre han estado allí. ¿Cómo sostener esta paradoja? Y es que todo se vuelve posible (incluso el alisado recesivo del tiempo, evocado por René Thom) desde el momento en que se admite una fuga de la disposición fuera de las coordenadas energético-espacio-temporales. E incluso en este caso, nos corresponde descubrir una forma de ser del Ser –antes, después, aquí y en todas partes– sin ser, no obstante, idéntico a sí mismo; un Ser procesual, polifónico, singularizable, de texturas infinitamente complejificables, a la medida de las velocidades infinitas que animan sus composiciones virtuales (Guattari 1992: 76-77).

No vale la pena poner estas frases en contexto porque el contexto es todo igual. Como puede verse, este posmodernismo epigonal se ha tornado caótico en el sentido vulgar de la palabra. Su locuacidad lo precipita en imágenes de velocidades infinitas, dimensiones exponenciales y ontologías polifónicas que nada tienen que ver con la definición matemática del caos, los fractales o la complejidad. Tampoco existe en ninguna ciencia conocida la escisiparidad como concepto, ni tiene sentido la idea de una estabilidad exponencial, ni todo es posible en un sistema caótico, ni hay una dimensión de tiempo en la teoría de catástrofes.

Hasta donde alcanza la mirada, el único autor de la corriente que exhibe un conocimiento un poco más elaborado y que se ha aventurado en lecturas de primera mano es Paul Cilliers, a quien ya hemos visto excluir caos y fractales del paradigma de la complejidad a contramano de los demás posmodernos, que gustan más de lo caótico que de lo complejo. Pretendiendo construir un modelo de coordinación entre las nuevas ciencias y el posestructuralismo cuyo detalle argumentativo no viene al caso, Cilliers reemplaza el marco caótico por una combinación de ideas de Ferdinand de Saussure y Jacques Derrida, autores por completo antitéticos[11]. De la definición saussureana del signo elimina luego el significado para dejar sólo el significante, convencido de que el conexionismo (su paradigma favorito) opera en función de ese concepto (Cilliers 1998: 38-44).

Acto seguido, Cilliers confunde las redes neuronales (un modelo computacional del cerebro) con el darwinismo neuronal de Gerald Edelman (un modelo darwiniano de la neurología), ignorando que este último, pese a haberse implementado en *software* mediante la famosa serie de autómatas Darwin, no responde al arquetipo conexionista clásico del PDP (pp. 100-105). Una vez más, Cilliers intenta combinar posturas inconciliables: como es bien sabido, Edelman mantiene desde hace años una guerra personal contra el conexionismo. Tras esto, Cilliers afirma que Zenon Pylyshyn y Jerry Fodor confunden redes neuronales con redes semánticas (p. 68), lo que tampoco es cierto; es más bien Cilliers quien cree que todas las redes neuronales excluyen la representación, siendo que esta exclusión es propia de sólo uno de los tres tipos existentes, que no es el más característico de los que se desarrollan en la actualidad (cf. Edelman 1987; Crick 1989; Smoliar 1989; Reeke y Edelman 1993: 174-178; Horgan 1998: 214-223; Pinker y Prince 1988).

---

[11] La aspiración de coordinar la lingüística de Saussure con la deconstrucción denota una seria falla de comprensión de textos esenciales, sobre todo *De la gramatología*. Derrida pretende precisamente deconstruir el *logos* en tanto razón y en tanto lenguaje; él entiende que la racionalidad y el modelo lingüístico han sido dominantes en la filosofía y es por ello que emprende su tarea deconstructiva. Saussure encarna la quintaesencia de la mentalidad que Derrida quiere abolir (Reynoso 2003).

Cilliers exige que el paradigma de lo complejo se circunscriba a sistemas de gran número de variables (1998: 3), exige que los modelos sean igual de complicados que las cosas modeladas (p. 24) y asegura que la complejidad es imposible de comprimir debido a la magnitud de su aleatoriedad (p. 10). Como ya hemos visto tantas veces, la numerosidad es más bien un asunto estadístico, no complejo, y frente a ella el nuevo paradigma no tiene nada que ofrecer (Bar-Yam 1997: xi; Hilborn 2000: 4, 73). En la ciencia de la complejidad se sabe que ésta es emergente incluso en sistemas con poquísimos grados de libertad y que, por más heterodoxa que ella sea, sigue pensando que los modelos deben ser más simples que la cosas, a riesgo de incurrir si así no fuere en la paradoja del mapa de Borges, que se quería que fuera del mismo tamaño y grado de detalle que el territorio a representar (Bak 1996: 14; Holland 1998: 24; Wolfram 2002: 40; Ferry 2004: 8).

Pero más allá de los errores de hecho, lo que más abunda en el texto de Cilliers son los contrasentidos: mientras que en diversos lugares el autor insiste en que los modelos de la complejidad deben ser complejos (1998: 25), en otro momento se olvida de la exigencia y describe las redes neuronales como un conjunto de unidades simples en el que la complejidad es un comportamiento emergente (p. 93); la retroalimentación, que estima "no necesaria" en uno de sus argumentos (p. 91), es una imposición requerida para que pueda manifestarse el cambio tres páginas después (p. 94). Podría continuar dando lata con los errores de Cilliers un largo rato; prefiero excusarme, sin embargo, de seguir analizando este enésimo intento de cooptación de un nuevo paradigma por parte de una filosofía en retirada. A fin de cuentas, ya debe haber quedado en evidencia que no hay afinidades dignas de nota entre las teorías de la complejidad y el posmodernismo.

No tiene mucho sentido extender la ejemplificación del uso que los posmodernos y posestructuralistas han hecho de la ciencia del caos, los fractales y las catástrofes. Todo lo que hay allí es más de lo mismo, y ya ha sido rebatido en otras ocasiones (Gross y Levitt 1994: 92-106; Bricmont 1996; Price 1997; Spurrett 1999a; Bouveresse 2000)[12]. Sin embargo, algunos autores con sólida formación matemática (p. ej. Aubin 1998) han defendido esta clase de lecturas "metafóricas" de las ciencias complejas emprendidas desde el campo intelectual, aún sabiéndolas absurdas, pretextando la opulencia de significados o el carácter peculiar del saber en las ciencias blandas, las cuales –dicen– tienen un objeto demasiado proteico como para sujetarse a criterios de precisión conceptual. No creo que se justifique ni el eufemismo, ni la jactancia, ni la condescendencia aquí implicados. Los posmodernos que se han metido a enseñar lo que no saben no lo hacen con el talante recatado y el bajo perfil de quien se reconoce inexperto; por el contrario, pontifican, imparten clases magistrales, presumen idoneidad, ironizan y ultrajan, dando por descontado que nadie percibirá las chapuzas porque en el imaginario intelectual los que leen siempre saben menos que los que escri-

[12] La impugnación más regocijante, sospecho, es un programa derivado de Dada Engine llamado Postmodern Generator, escrito por Andrew Bulhak (1996) de la Universidad Monash en Melbourne, capaz de generar textos posmodernos utilizando redes de transición recursiva; estas redes equivalen a los autómatas de almacén y a las gramáticas independientes de contexto en la jerarquía de Chomsky. El lector puede conectarse a http://www.elsewhere.org/cgi-bin/postmodern para obtener dinámicamente ensayos casi tan pedantes como los reales, incluyendo una buena dosis de causticidad, neologismos, espíritu didáctico, juegos de palabras y notas a pie de página. Comprobará que se asemejan a los textos de Guattari sobre el caos, como si las máquinas, cuando la inteligencia a simular es la de un posmoderno, pudieran superar la prueba que Turing (1950) les impuso.

ben. El problema es que, si se trata de ir más allá de Newton y del mecanicismo, ahora hay en la calle una opción más atrayente que la que ellos tienen para ofrecer, a la cual se puede llegar sin que haga falta su mediación.

Cuando introduje la problemática del pensamiento posmoderno en la antropología de habla castellana (Reynoso 1988, 1991) su nihilismo y la posibilidad que desencadenara un vaciamiento metodológico me resultaban preocupantes; ahora ya no. Aunque los posmodernos, lejos de la más mínima actitud reflexiva, contemplan con arrogancia las críticas que se les formulan, está comenzando a percibirse que sus concepciones acerca del caos no son sustentables ahora que es posible comprender mejor de qué se trata; hoy en día las matemáticas caóticas se enseñan en la escuela preparatoria y los modelos de agentes de tipo StarLogo forman parte de la currícula elemental (Martín y otros 1998). La incompetencia sistemática de los posmodernos es un síntoma que clama por un diagnóstico: es obvio que la educación en letras ha dejado de ser un bagaje suficiente para un pensador del tercer milenio que quiera expedirse sobre la práctica científica. Después de medio siglo en el que la gente de letras monopolizara la categoría de "intelectual", excluyendo a los científicos, la ciencia de las últimas décadas ha recuperado la iniciativa en la producción de ideas frescas y excitantes, que son, como piensa John Brockman (2000: 13), mucho más interesantes y productivas que las disputas marginales de unos mandarines pendencieros.

Tras treinta años de fatigar un conjunto de argumentos muy pequeño (genuinamente fractal en su régimen de auto-repetición), el posmodernismo se ha domesticado y es hoy una sombra de lo que fue. Algunos piensan ya que los fractales y la teoría del caos han creado un desafío directo a los posmodernos, recomponiendo las disrupciones que ellos crearan (Argyros 1991; Steenburg 1991; Riebling 1993; Byrne 1998: 42-46; Bentley y Maschner 2003: 3-5). Estudiosos antes vinculados a los estudios culturales, como Manuel DeLanda, comenzaron a pensar seriamente en términos de las teorías de la complejidad y fueron abandonando poco a poco el tono admonitorio y soberbio del posestructuralismo (Johnson 2003: 60). Hay quienes creen ahora que las teorías de la complejidad, decididamente alejadas del positivismo, pero "hacedoras de herramientas por excelencia" y comprometidas con una ontología realista, "golpearán al posmodernismo en la cabeza" (Byrne 1998: 47, 179).

Ahora bien, nadie puede reivindicar propiedad exclusiva de los asuntos de la complejidad y el caos, ni negarle a los posmodernos la prerrogativa de frecuentarlos, les inpiren o no nuevas ideas. Todo el mundo tiene derecho a interpretar como metáfora (o como le venga en gana) algo que en su origen tiene un sentido literal distinto. No es tan grave tampoco tener un canon de lecturas que responde a la ley del mínimo esfuerzo, o deducir significados y valores con los que los sabios a los que se interpreta no coincidirían jamás. Tal vez esas ideas, metáforas y significados, aunque la hermenéutica que lleva a ellos sea descabellada, sirvan a alguien para esclarecer algo. Pero, en honor a la verdad, ese no parece ser el caso.

5. Fractales: La geometría del caos

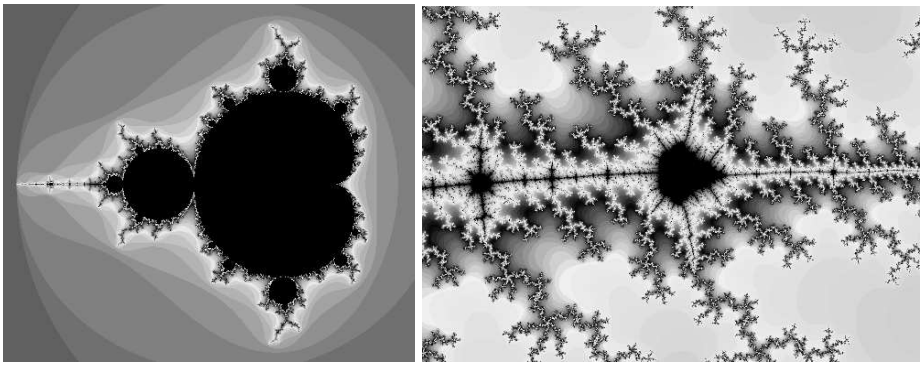


Fig. 5.1 – Fractal de Mandelbrot

5.1 – El significado conceptual de los fractales

Siempre pensé que el paradigma de la geometría fractal, con sus imágenes extrañas, estridentes y luminosas, con su inexorable sensación de infinito y vértigo, con sus estampas gráficas del caos mismo, llegó al mundo demasiado temprano o demasiado tarde. Digo temprano porque en aquellos años (la década de 1970) no había siquiera monitores de computadora que pudieran mostrar aceptablemente sus representaciones, que constituyen buena parte de su atractivo como propuesta científica. Cuando la tecnología se puso a la altura de ese pensamiento, quedó claro que, aunque demoraran en materializarse, ninguna otra corriente de la ciencia ha tenido, ni antes ni después, logotipos y signaturas comparables. Y digo tarde porque el tiempo de Mandelbrot, el padre de la idea, sobrevino cuando ya había muerto el movimiento psicodélico de los años sesenta, con su búsqueda de singularidades y visiones alternativas, al que los objetos fractales hubieran ofrecido una fuente inagotable de intenso placer. Cuando se generalizó el arte fractal con sus dibujos y sus músicas que abrían nuevas puertas de la percepción, ya no quedaban *beatniks* ni *hippies* con ánimo y en condiciones de apreciarlo. Pero tal vez éste sea el momento y el lugar oportuno para presentar la geometría fractal a una antropología resignada a afrontar la complejidad, a la que los fractales podrían brindarle, recién ahora pero por un tiempo de aquí en más, buenas oportunidades para repensar algunas de sus ideas.

Geometría, dice el título, y de eso se trata el asunto. Pero no es ya una geometría euclideana y abstracta de dimensiones enteras y elementos simples, sino una geometría accidentada y tortuosa de la naturaleza en estado salvaje. Para la antropología (lo anticipo en esta frase) el punto de motivación radica en que unos cuantos fenómenos culturales, no muchos pero sí suficientes, poseen a veces (en algunas sociedades al menos) configuración fractal: la música, los diseños de tatuajes y peinados, las pinturas corporales, los ornamentos, los motivos del arte rupestre y cerámico, los patrones de asentamiento, las caligrafías, las texturas, los tejidos, los procesos de cambio, las etnomatemáticas, las etno-lógicas, los sistemas de parentesco, las arquitecturas, las cosmologías, los mitos, los juegos, los mandalas. Familiarizarse con los fractales entraña encontrar una pauta que vincula ciertas manifestaciones de esas formas ya sea con rocas, montañas, nubes, corales, caracoles, galaxias y repollos, o con la sucesión de los estados del tiempo, las curvas "patológicas" de las matemáticas alternativas, el vaivén de las cotizaciones de la bolsa, las trayectorias de los ríos, las costas de un

continente, la evolución, las turbulencias, la criticalidad auto-organizada. No es que todo tenga que ver con todo, sino que hay un conjunto de homologías precisas y profundas que ahora comienzan a revelarse, y una opción para comprender mejor el azar y la necesidad. Pues unas cuantas cosas fueron siempre, aunque se lo ignorara, caóticas.

Si recién a esta altura del texto hablo de fractales, es porque sintetizan (literalmente) y confieren una expresión gráfica decisiva a muchos conceptos que hasta ahora fueron sólo objeto de discurso. Los fractales poseen un patrón observable y una estructura subyacente que se identifica con los procedimientos que los generan. En este contexto una estructura no ha de ser nunca más una entidad estática sino, como lo quería el antropólogo Siegfried Nadel, una sucesión de procesos en el tiempo, una secuencia de acontecimientos, un conjunto de reglas gramaticales de generación que, como sucede siempre en las complejidades emergentes, son en sí muy simples pero se aplican recursivamente muchas veces, dando lugar a una productividad que no es ni un ápice menos que infinita.

La geometría fractal, creo, encarna una forma teórica como la que debió haber adoptado el estructuralismo mecánico de Lévi-Strauss, pues en cierta manera es un estructuralismo recursivo y generativo, emergente y acotado a una escala. El proceso de generación de figuras fractales demuestra que los fenómenos observables, toda vez que sean complejos, no deberían ser el punto de partida para inferir linealmente la estructura de los mecanismos que los han engendrado. Menos aún si esa inferencia se elabora a fuerza de puro sentido común, como si los fenómenos constituyesen la superficie visible de algún patrón oculto, que a su vez sería una subsunción en clases de los objetos singulares que se perciben a simple vista. No por querer llegar al subsuelo de las estructuras primarias se alcanza sin más el terreno del pensamiento complejo. Igual que en esas expresiones con flechas retroalimentantes que plagan los textos de Edgar Morin, la relación entre las estructuras generativas y los objetos tangibles no puede menos que ser recursiva, no lineal. La amalgama del número y la lógica con la materialidad de la sustancia no se logra mediante la intuición, porque ambos planos son cualitativamente heterogéneos. El error del estructuralismo radica en que además (como hubiera dicho Bateson) mezcló los tipos lógicos. Una expresión lévi-straussiana como "la carne es a la naturaleza lo que los atuendos son a la cultura" no capta la idea; en el fondo de las cosas no hay ni naturaleza, ni clases sustantivas, ni objetos pertenecientes a una disciplina particular: sólo hay funciones genéricas y abstractas. No se trata ni de un platonismo de formas puras, ni de una lógica de lo concreto. Es nada más que una geometría, nunca rudimentaria, a veces exquisita, siempre un indicio de las complejidades a las que la mente y la cultura son capaces de llegar.

Pero eso no es todo lo que los fractales enseñan. Que los fractales de la cultura aparezcan en algunos casos y no en todos motivará, por añadidura, preguntas adicionales y significativas, pues esa especificidad revela, una vez más, una de esas diferencias que hacen una diferencia. Que formas diversas resulten de la aplicación de reglas idénticas (pero con distintos valores de variable) ilustrará el sentido del isomorfismo, de la multifinalidad, de la desemejanza entre número y cantidad. Que un pequeño cambio de parámetros desencadene en algún punto de inflexión una transformación extrema, servirá para contemplar en acción y comprender con la contundencia de las imágenes las ideas que se refieren a inestabilidades estructurales, morfogénesis, desorden, caos y catástrofes. Que se pueda encontrar en cada región de las geometrías una imagen de la totalidad remitirá al principio hologramático de Dennis Gabor, a las repeticiones rítmicas en el patrón corporal de la *creatura* batesoniana y

a los bucles gráciles y eternos que Douglas Hofstadter celebraba en *Gödel, Escher, Bach*. Hasta el cuadro de modelos que propuse al principio se verá revisitado: si las figuras euclideanas son la ilustración de principios simples y mecánicos, y los gráficos de tortas y barras el correlato de las magnitudes estadísticas, los objetos fractales habrán de ser las formas que materializan y trasuntan la complejidad misma.

5.2 – Las geometrías de la naturaleza (y la cultura)

Cuando Benoît Mandelbrot se lanzó a buscar soluciones para una pregunta clásica formulada por el meteorólogo inglés Lewis Fry Richardson (¿cuanto mide la costa de Gran Bretaña?) encontró que la medida depende de las convoluciones de la línea de costa y de la sensibilidad de la regla usada para la medición. Descubrió también que la variación de la longitud que resulta de cambiar el tamaño de la regla linealmente a ½, ¼, 1/8, 1/16 … no es lineal. Para obtener una línea recta, hay que trazar un gráfico que relaciona el logaritmo de la longitud de la costa contra el logaritmo de la longitud de la regla, una situación que ya encontramos en otros fenómenos luego definidos como caóticos (la criticalidad auto-organizada y las distribuciones de Zipf, Pareto y Barabási, la ley de potencia, los atractores genéticos de Kauffman); el ángulo de inclinación de la recta graficada de este modo mide además la anfractuosidad de la costa: cuanto más inclinada, más tortuosa. Si se aumenta la resolución al doble, la longitud no aumentará en la misma proporción; puede que se incremente poco o mucho, dependiendo de lo accidentado que sea el objeto a ser medido. Richardson ya sabía que cada país asigna un valor diferente a la longitud de su frontera común: España afirma que su frontera con Portugal mide 987 kilómetros, mientras Portugal alega que alcanza 1214; para Holanda, el límite con Bélgica es de 380 km, pero ésta dice que mide 449. Todos tienen razón. Una curva natural no posee una longitud "objetiva"; pero tampoco es subjetiva, sino estrictamente relativa a la sensibilidad de la medida. Como en la paradoja de Aquiles y la tortuga, cuando la regla tiende a cero, la longitud tiende al infinito.

Muy pronto Mandelbrot pudo determinar que las curvas de la naturaleza (igual que muchas de las curvas aberrantes de la antigua matemática) no poseen dimensiones enteras, como las que son propias de las formas ideales de la geometría euclideana: dimensión 0 para el punto, 1 para la línea, 2 para la superficie y 3 para el volumen. Lo dice Mandelbrot desde el principio: "Ni las nubes son esféricas, ni las montañas cónicas, ni las costas circulares, ni la corteza es suave, ni tampoco el rayo es rectilíneo" (2003: 15). Dependiendo de su irregularidad, la dimensión de las costas resulta ser, sorprendentemente, un número fraccional. La definición simple de una dimensión fractal es la de un número que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico o de un objeto natural. A veces se la llama dimensión de Hausdorff-Besicovich, aunque las definiciones de ambas dimensiones difieren un poco (Barnsley 1993: 195). Para fractales bidimensionales, la dimensión fractal es un número real mayor que 1 y menor que 2; la costa de Gran Bretaña, por ejemplo, posee una dimensión fractal de aproximadamente 1.2. Mandelbrot ni siquiera se preocupa por suministrar la prueba matemática de que en la naturaleza existen dimensiones no enteras; por un lado, eso no puede hacerse formalmente, pues "en ninguna ciencia natural es concebible una demostración de esta clase"; por el otro, quienes sostengan que todas las dimensiones son enteras son los que de ahora en más tendrán que dar sus razones (Mandelbrot 2003: 55).

Esa idea tiene algunas consecuencias metodológicas interesantes para antropólogos y demás estudiosos interesados en determinar la naturaleza y dimensión fractal de una curva mediante el procedimiento conocido como "conteo de cajas" (*box counting*). Una vez que se determine que una traza es de cualidad fractal, se podrá explorar un conjunto de propiedades que tiene toda figura de esa clase. Imaginemos que se trata del perímetro de un asentamiento o territorio. El método es práctico y tan simple que ni siquiera hace falta medir. Se resuelve así: se coloca inicialmente una grilla de 2x2 sobre el perfil a computar, y se cuenta el número de casilleros ocupados por la curva; se hace lo propio con una grilla de 4x4, 8x8, 16x16, 32x32, 64x64… Se disponen luego dos columnas, consignando en una el logaritmo natural de la inversa de la longitud de las unidades de grilla, o sea ln(1/longitud), y en la segunda el logaritmo natural del número de escaques ocupados correspondientes. Supongamos que la tabla resultante sea la que sigue:

Ln(1/longitud)	Ln(ocupado)
-2.30259	0.00000
-1.60944	1.38629
-0.91629	2.30359
-0.22314	3.21888
0.47000	4.17439
1.16315	5.03044
1.85630	5.71703

Eliminando la primera línea, dado que contiene ceros, puede trazarse el gráfico XY de dichos valores, el cual, como puede esperarse después de lo que ya se sabe sobre caos, resultará en una línea recta si el perímetro es fractal. Si este es el caso, para determinar la dimensión fractal aproximada de la curva (o sea, la pendiente de esa línea recta) se usa la fórmula siguiente:

$$p = \left(\frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \right)$$

Reemplazando los valores por los extremos de la tabla, tenemos:

$$p = \left(\frac{(5.71703) - (1.38629)}{(1.85630) - (-1.60944)} \right)$$

Para el caso que estamos ilustrando, que corresponde a valores para el perímetro del estado de México según Monroy Olivares (2002: 133), la dimensión fractal es 1.24958. Existen numerosos programas de computación para análisis de la dimensión fractal; el más elaborado que conozco es HarFA, diseñado en la Universidad Tecnológica de Brno.

Mandelbrot llamó fractales a los objetos que poseían esas dimensiones intermedias, que en seguida comenzaron a revelar también otras características inesperadas. Son objetos que poseen formas irregulares, accidentales o interrumpidas, y que siguen siendo así a cualquier escala que se produzca su examen, dentro de ciertos rangos que sólo a veces se precipitan hacia el infinito. Eso define una característica que se llama homotecia interna: los pequeños detalles y la configuración global son estructural y visualmente parecidos. Igual que en los hologramas, en cada parte está el todo. Una rama de una planta tiene otras ramas que poseen su misma estructura, y así recursivamente. Que algo sea autosimilar implica también que es independiente de escala, o que no tiene una escala inherente: si miramos a algún de-

talle de un objeto fractal a cierto nivel de magnificación, lucirá como algún otro detalle a un nivel de magnificación distinto (Hilborn 2000: 57). La homotecia o autosimilitud no puede faltar en un fractal. La palabra fractal no distingue, adrede, entre conjuntos matemáticos (la teoría) y objetos naturales o culturales (la realidad). Deriva de *fractus*, un adjetivo latino cuyo verbo correspondiente es *frangere*, que significa "romper en pedazos". La geometría consagrada a estos objetos proporciona una matemática relativamente simple para dar cuenta, sintetizar y comprender "formas veteadas, o como hidras, llenas de granos, pustulosas, ramificadas, o como algas, extrañas, enmarañadas, tortuosas, ondulantes, tenues, arrugadas" (Mandelbrot 2003: 19-20).

Una noción importante de la geometría fractal es la idea de dimensión física efectiva, que se ha encontrado que no tiene un valor absoluto para los objetos reales, aún cuando se los considere euclideanamente. Un ovillo de 10 cm de diámetro, hecho con hilo de un milímetro de sección tiene varias dimensiones efectivas distintas. Para un grado de resolución de 10 metros se lo percibe como un punto, y por lo tanto es una figura de dimensión cero. Para el grado de resolución de 10 cm es una bola tridimensional; para 10 mm es un conjunto de hilos de dimensión 1; para una resolución de 0.1 mm cada hilo se convierte en una especie de columna y vuelve a ser tridimensional; a un nivel todavía más fino será un conjunto de átomos, un polvo, cada uno de cuyos elementos es nuevamente de dimensión cero. El hecho concreto es que el resultado numérico depende de la relación entre el objeto y el observador (Mandelbrot 1988: 21). Se trata, no obstante, del observador en el sentido objetivo de Henri Atlan (1991: 135), y no del creador soberano de realidades ilusorias de Maturana y los constructivistas: la dimensión fluctúa, es verdad; pero es una función rigurosa de la escala de observación.

Las secciones siguientes de este capítulo proporcionan una tipología preliminar de los objetos fractales conforme a sus estructuras matemáticas y a sus reglas de construcción. Es una tipología de ocho miembros de complejidad y abstracción creciente que constituyo a efectos de ordenar un poco el campo, pues, aunque cueste creerlo, nunca se ha propuesto ninguna, y la definición de las condiciones que debe cumplir un objeto o una geometría para ser fractal tampoco se ha establecido axiomáticamente, excepto por la frase que dice que fractal es "un conjunto cuya dimensión de Hausdorff-Besicovich es estrictamente mayor que su dimensión topológica" (Mandelbrot 2003: 32). Siguiendo la sugerencia de Ron Eglash, la especificación informal de las condiciones que debe cumplir una figura para calificar como fractal incluye: (1) recursividad; (2) escalación o invariancia por cambio de escala; (3) autosimilitud, ya sea estricta o aproximada; (3) infinitud; y (5) dimensión fraccional (Eglash 1999: 17-19). Es mejor que estas condiciones sean informales y lo sigan siendo, dado que los fractales son, según toda probabilidad, una clase difusa; dada una figura compleja, que un rasgo sea efectivamente fractal no se decide en términos booleanos, sino en función de un valor sobre un continuo de posibilidades (Falconer 1990: xx). Algunas figuras son muy buenos fractales; otras lo son apenas. Así como en este mundo de formas las dimensiones no son enteras como en Euclides, los criterios tampoco son booleanos como en Aristóteles.

La presentación de los fundamentos de la tipología que presento procura evitar el síndrome recurrente de los textos que se refieren a fractales, que es el de proporcionar siempre la misma argumentación introductoria, en una vorágine de auto-repetición que se ha convertido en una plaga endémica en el cuerpo extenso de la intertextualidad. Todos los textos repiten los mismos rudimentos. Aunque algún régimen de redundancia y similitud es inevitable

si se quiere que el discurso resulte inteligible para los no iniciados, he procurado imprimir al tratamiento del asunto una estructura que (*a*) evite malentendidos comunes que se han ido sedimentando con los años; (*b*) sin prescindir de una definición precisa, minimice los aspectos matemáticos que no sean de extrema necesidad y urgencia; (*c*) conduzca de inmediato al uso técnico de los instrumentos fractales por parte de estudiosos de arqueología y antropología sociocultural; (*d*) ilustre cada tipo con ejemplares provenientes de la cultura y (*e*) destaque las cuestiones teóricas dominantes de relevancia en cada caso, recurriendo a las formulaciones originales antes que a divulgaciones diluidas y mil veces destiladas.

En lo que hace a su apariencia visual, algunos de los tipos fractales remiten a formas que sólo se encuentran en la naturaleza o en la abstracción de las altas matemáticas (agregación limitada por difusión, atractores extraños, cuaterniones, fractales basados en números hipercomplejos); otros tipos (IFS, Sistemas-L, curvas monstruosas, teselaciones) se manifiestan tanto en la naturaleza como en la cultura. Cada uno de los tipos presenta un diferente plan gráfico, conceptual o sonoro, una gramática peculiar y una relación distintiva con las problemáticas del caos y la complejidad.

5.2.1 – Curvas monstruosas y dimensiones fraccionales

Muchos textos introductorios exageran el estigma de ciertas formas complejas en la geometría clásica, e interpretan su redescubrimiento por Mandelbrot como una especie de desagravio histórico. Pero aunque en las matemáticas siempre hubo números irracionales y trascendentales, fracciones, paradojas y objetos incomprensibles para el sentido común, hay que reconocer que la geometría fractal tipificó y reivindicó unas cuantas clases que algunos matemáticos del pasado entrevieron como "patológicas", "monstruosas", "extravagantes" o "perversas". Un inocente número como 10^{12} denota una magnitud que es de un tamaño tal que se la ha llamado τερας (*tera*), o sea "monstruo". Hoy en día son esos juicios despectivos, antes que las figuras, las que se perciben como raros, curiosos y aberrantes. La geometría fractal revierte los valores; cuanto más monstruosa una entidad, más fractal. Mandelbrot quiere que los actores de esa rehabilitación hayan sido Georg Cantor, Giuseppe Peano, Henri Lebesgue, Felix Hausdorff, Abram Besikovich, Bernhard Bolzano, Helge von Koch, Ernesto Cesàro, William F. Osgood, Wasław Sierpiński, Pavel Urysohn y por supuesto él mismo (2003: 18, 27, 61, 87, 189, 213). Creo que en su panteón podrían agregarse algunos otros nombres, como Leonardo Fibonacci, Nikolai Lobachevsky, János Bolyai, John Horton Conway y August Möbius.

Fig. 5.2 – Polvo de Cantor

Solamente consideraremos dos ejemplares de ese zoológico de formas. El primero es el polvo de Cantor. Hacia 1872, Georg Cantor (creador de la teoría de conjuntos) utilizó la peculiaridad de esta transformación que tiende a esfumar las formas casi se diría demasiado pronto para ilustrar conceptos de infinito. Partiendo de una recta, se elimina recursivamente su tercio central. A escala de páginas, por larga que sea la línea al cabo de unas pocas itera-

ciones comienza a percibirse como tendiendo a puntos. La misma pulverización se manifiesta con superficies, volúmenes (esponjas de Menger) e hipervolúmenes. En cualquiera de los casos, luego de unas pocas iteraciones (siete u ocho, cuando mucho) las motas de polvo superan la capacidad de resolución de cualquier imprenta, ojo o monitor gráfico. En el límite el número de puntos es infinito, pero su longitud es cero; sólo en ese límite se encuentra el conjunto de Cantor propiamente dicho; en las fases intermedias las figuras son prefractales (Addison 1997: 9). Como fractal, el polvo de Cantor es iterado, autosimilar en todas las escalas y posee dimensión 0.6309297 (*log* 2/*log* 3).

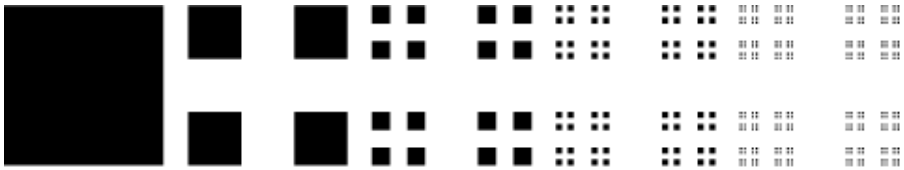


Fig. 5.3 – Polvo de Cantor

El segundo monstruo es la curva de Helge von Koch. Partiendo de una recta, se reemplaza su tercio central por un triángulo equilátero. A medida que se va iterando, la recta comienza a llenar el plano y su longitud comienza a crecer exponencialmente.

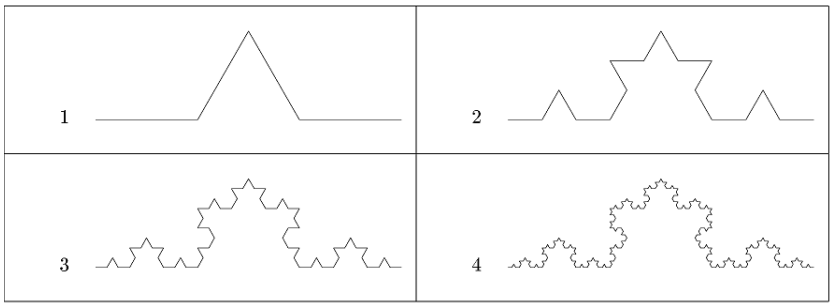


Fig. 5.4 – Curva de Koch

Aún teniendo como límites los extremos de la línea real, su longitud efectiva al cabo de un pequeño número de iteraciones puede ser suficiente para dar varias veces la vuelta en torno del Ecuador. Tras 23 iteraciones, por ejemplo, el número de segmentos se acerca a los cien mil millones. En el límite, un espacio finito contiene una curva infinita.

Más adelante proporcionaré los métodos constructivos de semejantes objetos, sumamente abundantes en guardas, paneles y grecas de diversas culturas, a veces explícitamente asociadas a algoritmos, gramáticas o etno-lógicas capaces de generar sus configuraciones.

5.2.2 – Agregación limitada por difusión y movimiento browniano

Uno de los antecesores reconocidos por Mandelbrot en este campo es nadie menos que Norbert Wiener, el padre de la cibernética, quien, "con gran sorpresa y placer" se animó a definir y estudiar con rigor un primer modelo no diferenciable del movimiento browniano en 1956 (Mandelbrot 2003: 27). Un camino al azar (*random walk*) es una traza generada por un proceso *estocástico*, similar al que se presenta en el movimiento browniano. No habría que confundir esto con las configuraciones que se generan mediante un proceso *aleatorio*, como el llamado ruido blanco. En el movimiento browniano la posición siguiente de un punto se toma a partir de la posición actual; en el ruido blanco cualquier posición es posible. En la llamada música browniana (o "marrón") cada nota es un intervalo respecto de la

nota anterior; en la música de ruido blanco o ruido de Johnson, cada nota es un grado cualquiera de la escala.

A fin de clarificar las relaciones entre azar, caos y estocasticidad que la bibliografía usual suele confundir, la figura 5.5 muestra los perfiles característicos de las tres especies seriales: el ruido $1/f^0$ corresponde a procesos aleatorios de correlación nula, el $1/f$ o ruido rosa al caos determinístico de correlación intermedia (vinculado con la distribución de ley de potencia) y el $1/f^2$ a los fenómenos estocásticos de alta correlación. Cuando se traten más adelante las variedades recursivas volveré sobre esta cuestión.

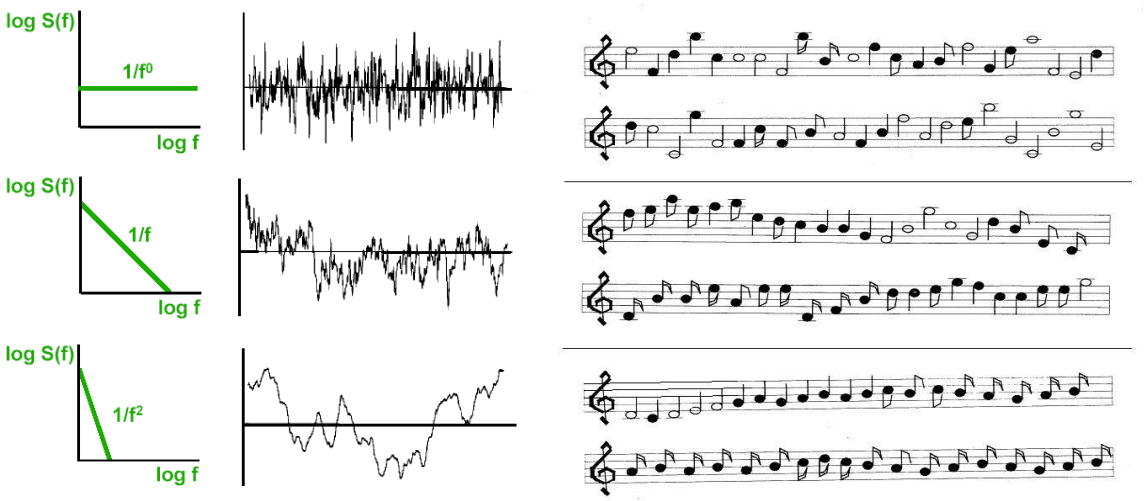


Fig. 5.5 – Ruido blanco, caótico y browniano

El movimiento browniano se relaciona matemáticamente con el proceso de agregación limitada por difusión que se encuentra también en el crecimiento de los cristales, las formaciones de coral, las nubes, las costas, las texturas, las montañas y otros procesos y fenómenos naturales. Una de las formas características de los fractales de agregación son los plasmas, que formalmente utilizan un algoritmo de desplazamiento del punto medio que ya era conocido por Arquímedes como método de construcción de parábolas. A decir verdad, no son los fractales más puros que existen; tienen, es cierto, dimensión fractal y autosimilitud, pero son estocásticos en vez de deterministas.

Hasta donde conozco, no hay analogías geométricas entre los fractales de agregación y las manifestaciones plásticas o arquitectónicas de la cultura, aunque hay algunas excepciones a esta norma: la música aleatoria de John Cage, Karlheinz Stockhausen o Pierre Boulez, ciertas pinturas de Jackson Pollock o la escritura automática de los surrealistas. Que estas manifestaciones sean exploraciones deliberadas en la dimensión estocástica en formas de arte y estéticas autoconscientes del siglo XX, demuestra que los patrones dominantes en las representaciones visuales y sonoras de la generalidad de las culturas conceden al azar un papel muy modesto. No obstante, los fractales de agregación limitada han sido señalados en los patrones de crecimiento de plantas urbanas por Michael Batty y Paul Longley (1994) en su extraordinario estudio *Fractal Cities*. Batty también ha aplicado herramientas de autómatas celulares a la lógica de expansión de las ciudades (Batty y Xie 1997; Batty, Couclelis y Eichen 1997). Aún cuando las plantas urbanas sean cartesianas, el patrón de su propagación no lo es, como si más allá de la naturaleza geométrica de la semilla todo crecimiento deba

ser de naturaleza fractal. Hoy en día los fractales de agregación son de uso rutinario en los estudios poblacionales de la geografía computacional.

Una excepción a la escasa atención prestada por el arte a los fractales turbulentos es la anotación y los esbozos de Leonardo Da Vinci, con seguridad vinculados entre sí. En sus anotaciones dice de las manchas en una pared: "No puedo abstenerme de mencionar… una nueva herramienta de estudio… que puede parecer trivial y casi ridícula [pero] que es extraordinariamente útil para excitar la mente… Mira una pared salpicada con manchas, o con una mezcla de piedras… puedes descubrir su semejanza con paisajes… batallas con figuras en acción… extraños rostros y vestimentas… y una infinita variedad de objetos". Esta parece una descripción de un fractal de difusión limitada. He ilustrado los experimentos de Leonardo con nubes y turbulencias a la izquierda de la fig. 5.6; a la derecha se muestra un plasma convertido a una cadena montañosa en tres dimensiones.

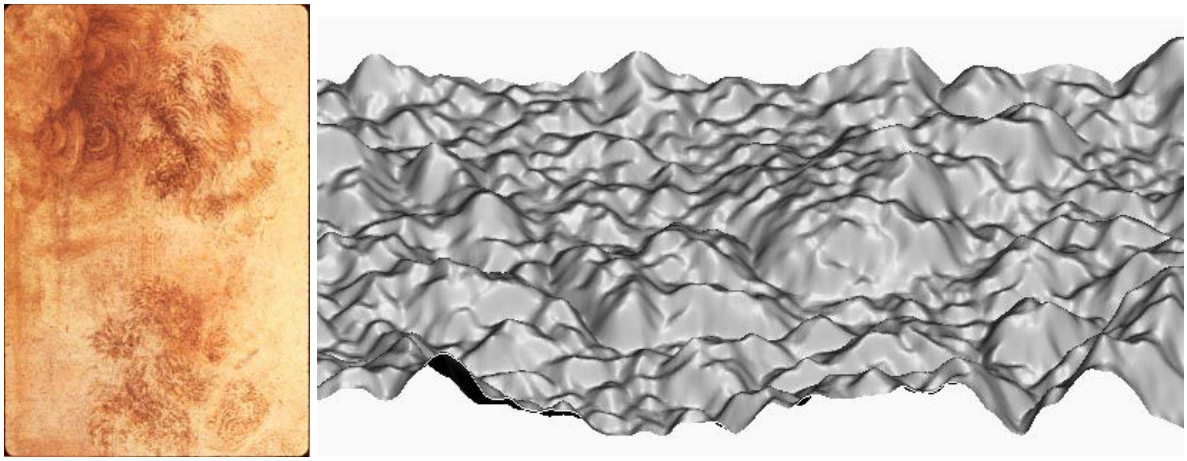


Fig. 5.6 – Leonardo: Diluvio, *ca* 1514 – Montañas de plasma

Hace ya unos cuantos años, procesos aleatorios y estocásticos análogos a la difusión limitada (cadenas de Markov, método de Montecarlo, meta-heurísticas de filtrado) se vienen utilizando en la simulación y análisis de procesos históricos, tales como migraciones o distribuciones de artefactos en un sitio o una geografía. En diversos campos de estudio, desde el análisis financiero hasta la física de la percolación, se han ensayado distintas clases de fractales como herramientas de modelado y descripción (Maldelbrot 1989). Este campo es en realidad bastante complicado; hay un repertorio muy grande de variedades de movimientos brownianos, fenómenos de escalas con exponentes fraccionales o negativos, distribuciones de ley de potencia sutilmente distintas, clases de monofractales con homotecia estricta al lado de mesofractales, pre-multifractales y multifractales con diversos géneros de autosimilitud; las matemáticas correspondientes son mucho más intrincadas de lo que resulta conveniente tratar aquí.

5.2.3 – Recursividad: El eterno y grácil bucle

La recursividad es un principio que se manifiesta con enorme frecuencia tanto en la lógica de los algoritmos como en los objetos fractales. No obstante, desde un punto de vista más estricto, la recursividad no es suficiente para convertir una geometría o un objeto en fractal o caótico. Dependiendo del autor, se requiere además que sea homotético, complejo, que posea dimensión fractal, exponentes de Lyapunov, distribuciones de ley de potencia, Zipf o

Pareto. Curiosamente, el concepto de recursividad casi no aparece en los textos de Mandelbrot y no siempre se encuentra en los estudios que tratan ya sea del caos en general o de los fractales en particular. Mientras la geometría euclideana se funda en ecuaciones analíticas, la fractal se origina en algoritmos recursivos.

Hay además diversos tipos de recursividades. Ron Eglash distingue (1) la recursión en cascada, en la cual hay una secuencia determinada de procesos similares; (2) la recursión iterativa o retroalimentación, como en la serie de Fibonacci o regla áurea; (3) la recursión mediante auto-referencia, cuya mejor ilustración acaso sea la de una escena en la que un pintor se muestra pintando el mismo cuadro que la escena representa (Eglash 1999: 109-111). Las formas algorítmicamente más simples de la recursión se manifiestan a veces como repeticiones periódicas o no periódicas de una misma forma, como en los mosaicos teselares. Hay autores que aseguran que las teselaciones no son recursivas (Penrose 1996: 163-175). Técnicamente se considera recursiva una definición basada en otra instancia de lo que se quiere definir. En nuestros modelos de parentesco, los antropólogos manejamos impensadamente algunas definiciones recursivas, como la de antepasado o descendiente. Esta especificación en lenguaje Prolog puede que clarifique el concepto.

```
antepasado(A,C) :- padre(A,B); antepasado(B,C)
```

El elemento visual emblemático de la recursividad (aunque no el único) es la forma en espiral, que a su vez puede ser lineal o logarítmica, bidimensional o tridimensional. La forma de espiral y sus estilizaciones se manifiestan con frecuencia en la naturaleza, más localizadamente en la cultura y algunas veces en los vórtices de ciertos fractales, casi siempre en los más complejos, en regiones límites que casi siempre tienen que ver con las vecindades del caos o las cuencas de atracción.

En lo que toca a diversos fenómenos sonoros, imaginarios, intelectuales o matemáticos, la enciclopedia por excelencia de la recursividad aplicada sigue siendo *Gödel, Escher, Bach* (Hofstadter 1992), aunque es de lamentar que su autor no estuviera familiarizado con la geometría fractal en el momento de escribirlo. Una de las líneas de razonamiento más interesantes de Douglas Hofstadter es la que se ocupa de la organización de los sonidos y patrones en la música. Después de Hofstadter ha habido toda una discusión entre los que afirman y los que niegan que todas las estructuras de la música en todas las culturas es fractal, o al menos recursiva (Gardner 1978). La opinión de Ron Eglash es que sí lo es, a excepción del *rap* y de composiciones como las de John Cage, que violan intencionalmente los códigos (Eglash 1995 y comunicación personal).

Universal o no, hoy en día es práctica común sintetizar o analizar música en base a series de Fibonacci, distribuciones de ley de potencia u otros algoritmos fractales, técnicamente definidos como ruidos 1/*f*. La investigación actual en fractales y teoría del caos sugiere que el diseño y la apreciación de lo que en Occidente se ha dado en considerar objetos estéticamente placenteros (en sociedades más autoritarias tal vez se diría “formalmente correctos”) se encuentra determinada por reglas subyacentes que imponen constricciones a la forma en que las estructuras pueden presentarse (Voss y Clarke 1975; 1978; Pickover 1990: 28-30). En el campo de la semiología de la música se cree que ese principio es válido para todas las culturas. Diversos investigadores han realizado experimentos de laboratorio de apreciación musical que parecen confirmar estas ideas, utilizando algoritmos genéticos y métricas basadas en la ley de Zipf como criterio de adecuación (Manaris y otros 2003).

Hasta que se publicaron los estudios de Ron Eglash, la antropología, a excepción de algunas observaciones desperdigadas en la obra de Bateson, no ha sabido tratar la recursividad con un poco de imaginación. Tampoco lo han hecho acabadamente las formas discursivas del paradigma de la complejidad. En el tratamiento que ha dado al asunto Edgar Morin (1999: 212-228) el concepto está distorsionado por su atadura a otra idea (la auto-organización), lo cual conduce a que se vacíe de precisión formal y a que se despeñe, vía von Foerster y Maruyama, en una mística de celebración de la retroalimentación positiva. Las argumentaciones de Morin, en el contexto de sus habituales ejercicios de oposición entre una cibernética mecanicista perversa y otra buena y humanizadora, tratan de disimular que el concepto de recursividad ya estaba suficientemente articulado en el tratamiento que dio Cannon (1932) a la homeostasis, y que su propia concepción carece de una especificación matemática y de una ontología precisa; la "apertura" y la propensión al cambio de las máquinas recursivas que Morin tiene en mente, además, se lleva bastante mal con la exigencia de autonomía, mantenimiento del equilibrio y clausura operacional de las máquinas autopoiéticas, a las que Morin se afana por ensalzar en el mismo trámite.

Fig. 5.7 – Tatuaje tradicional Maorí – Bajorrelieve Maorí

En cuanto a las formas visuales de la recursividad, Clifford Pickover, biofísico, bioquímico y artista fractal, reúne en su libro clásico sobre los patrones del caos y la belleza numerosos ejemplos de espirales (tanto simples como fractales) provenientes de la naturaleza, la cultura y la imaginación matemática (Pickover 1990: 195-225). Merecen señalarse los espirales simples de las escrituras Thai, Farsi y Tamil, los más complejos de los tatuajes faciales de los Maoríes de Nueva Zelanda, las gárgolas góticas, las signaturas y los diseños victorianos, los signos para las malas palabras de los dibujantes de tebeos, las configuraciones percibidas tras la ingestión o aspiración de alucinógenos, las marcas rupestres trazadas en lo que alguna vez se llamó la Edad de Hierro, los signos celtas, los tangkas tibetanos, las pinturas de Joan Miró.

Algunos dibujos alucinatorios de las culturas Tukano y Barasana según Gerardo Reichel-Dolmatoff (1978) tienen cualidades semejantes. En el Museo del Oro de Bogotá he podido apreciar una fuerte concentración regional de diseños espiralados en objetos de los Muisca,

Malagana, Quimbaya, Tairona, Tumaco, Cauca, San Agustín, Tolima, Uraba y Sinu, casi siempre en relación con simbologías de la vida, la muerte y el tiempo. Un símbolo obvio de recursividad es el diagrama cibernético de retroalimentación; otro es el uroboros, la serpiente o dragón que se muerde la cola, del cual algunos pretenden que se deriva el emblema del infinito. Aunque dista de ser universal, como pretenden gnósticos y jungianos, el uroboros y sus equivalentes poseen una distribución considerable.

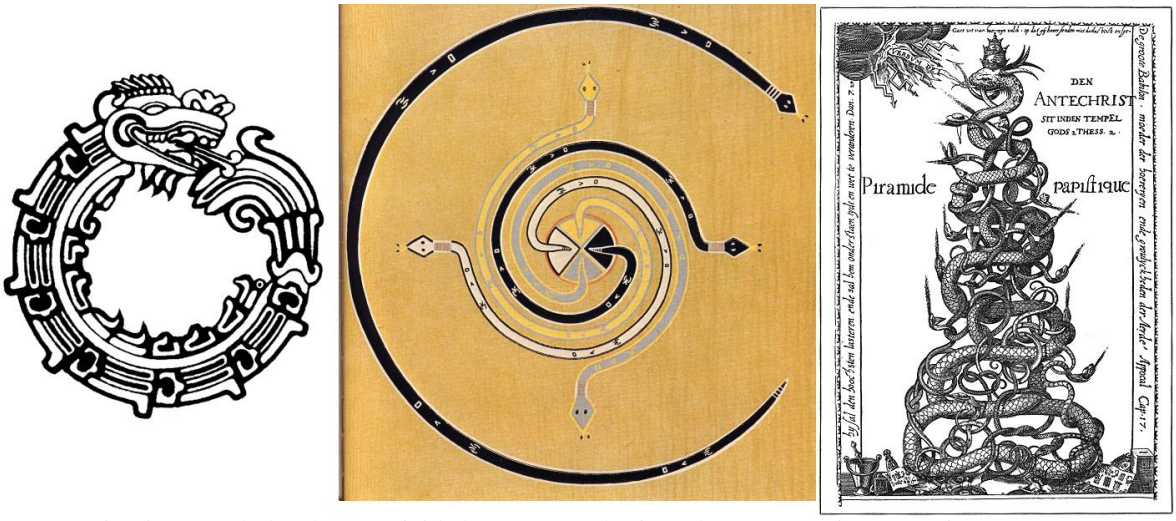


Fig. 5.8 – Símbolos de recursividad azteca (¿), aborigen de Norteamérica y anónimo europeo

Ron Eglash, por su parte, ha registrado espirales, series de Fibonacci y procesos recursivos en diversas culturas de Africa, particularmente entre los Aka y otras sociedades de Ghana y los Tabwe del Congo. Más llamativamente todavía, ha documentado la ausencia de esta clase de representaciones entre las culturas nativas de América del Norte (a excepción del noroeste de Estados Unidos) y en Oceanía (a excepción de los Maoríes) (Eglash 1999: 47-48, 104-108, 129-130). En muchos de los estudios que hasta ahora se han realizado se echa de menos un tratamiento más sistemático de clases y tipologías, así como un examen cultural más exhaustivo. Pero ya sea para ordenar las formas o para explicar sus correlaciones, su historia, su proliferación o su ausencia, los antropólogos y demás estudiosos de las humanidades tienen material suficiente para ponerse a pensar.

5.2.4 – El juego del caos: Sistemas de funciones iteradas (IFS)

El punto de partida de Michael Barnsley es el opuesto al de Mandelbrot. Barnsley pensaba que los fractales de Mandelbrot y Julia podían ser vistos como el resultado de un proceso determinístico, pero también como el límite de un proceso aleatorio. En lugar de tomar como punto de partida el desarrollo de fórmulas para ver qué dibujos surgían, Barnsley revirtió el proceso: dada una forma, escoger el conjunto de reglas que la generan. Este es el "problema inverso" de la geometría fractal. La respuesta pronto se conoció como "el teorema del collage", o más popularmente "el juego del caos". Si la figura es complicada (no compleja), las reglas serán complicadas; pero si en el objeto hay un patrón fractal, alcanzarán unas pocas reglas para generarlo. El teorema expresa que para encontrar un IFS cuyo atractor se asemeje al de un conjunto dado, se debe encontrar un conjunto de transformaciones (mapas de contracción) en un conjunto adecuado, tal que la unión o collage del conjunto que se está transformando se asemeje al conjunto que se quiere alcanzar.

Barnsley se lanzó a especular que la naturaleza jugaba su propia versión del juego del caos (una intuición de nuevo no muy alejada de algunas ideas de Bateson): la idea fundamental es que habría un límite para la complicación aleatoria de una hoja de helecho, por ejemplo, y que su conformación no debería obedecer a una pauta azarosa y distinta para cada ejemplar, sino más bien a una pauta única; lo sorprendente sería lo contrario (Barnsley 1988; 1993). John Hubbard complementó esa visión afirmando que aún en la más compleja forma conocida no hay azar en absoluto: según él, nada que sea aleatorio tiene relevancia para la biología; cuando se clonan gráficamente plantas, el orden y la disposición en que brotan las hojas es siempre exactamente el mismo, y nada queda librado a la casualidad.

El formalismo matemático en el que se plasma la familia elaborada por Barnsley y Hubbard se conoce como IFS, acrónimo de "sistemas de funciones iteradas". En álgebra se habla también de transformaciones afines lineales o de máquinas copiadoras de reducción múltiple (MRCM). La idea de estas transformaciones es muy sencilla, y cualquiera que haya manejado un programa de diseño gráfico se habrá tropezado con ella: para llevar a cabo una transformación afín lineal todo lo que hay que hacer es tomar un motivo y copiarlo, trasladarlo, escalarlo, espejarlo o rotarlo. Si aún los programas más módicos incluyen estas prestaciones, es porque las operaciones matriciales subyacentes son muy simples, y son siempre de la misma naturaleza algebraica independientemente de lo que represente la figura terminal. Una traslación es una suma; un cambio de tamaño y una rotación, son multiplicaciones; una simetría en espejo, lo mismo pero en diagonal. Cuando uno realiza esas transformaciones, el programa está operando con matrices algebraicas y vectores. El repertorio de transformaciones posibles es astronómico, y el número de imágenes de los que se puede dar cuenta en esos términos también lo es.

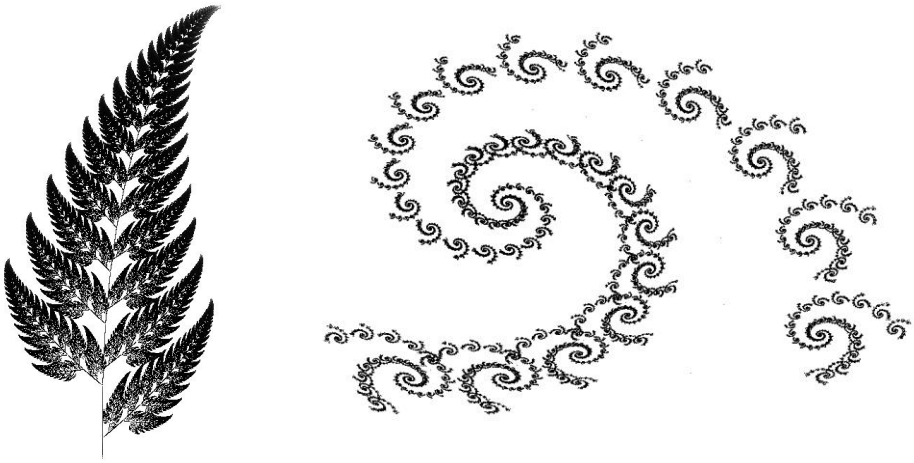
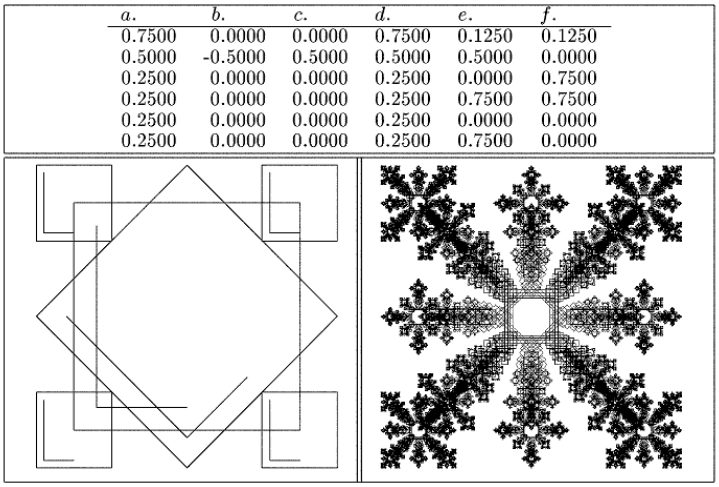


Fig. 5.9 – IFS – Helecho y Espirales

La figura 5.9 muestra dos IFS bien conocidos. El procedimiento para generar fractales de este tipo es por lo general muy sencillo. Los programas usuales (Winfract, ChaosPro, UltraFractal) lo hacen sin que uno tenga que intervenir demasiado, pero siempre se puede variar la fórmula manualmente para probar otras posibilidades. Otras soluciones como Brazil, IFS Toolkit e IFSDesign permiten generar IFS con fina capacidad de transformación.

Las imágenes de este género se pueden sintetizar ya sea proporcionando las matrices algebraicas, o acomodando los marcadores gráficos que representan los mapas de contracción. Aparte de plantas, helechos, algas, torbellinos, corales, cristales y encajes, otros fractales tí-

picos que se generan de esta forma son los familiares tamices (*gaskets*) triangulares, cuadrangulares o cúbicos de Wasław Sierpiński, cuya estructura calada peculiar es semejante a la de numerosos patrones de decoración en cerámicas, tejidos y paneles arquitectónicos en diversas culturas, incluyendo casos tan familiares como la torre Eiffel (Barnsley 1993: 115-116; Flake 1999: 93-110; Mandelbrot 2003: 599). En su manifestación computacional, los IFS se realizan siempre como nubes de puntos que a medida que iteran van adquiriendo su forma definitiva.



a.	*b.*	*c.*	*d.*	*e.*	*f.*
0.7500	0.0000	0.0000	0.7500	0.1250	0.1250
0.5000	-0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.0000
0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.0000	0.7500
0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.7500	0.7500
0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.0000	0.0000
0.2500	0.0000	0.0000	0.2500	0.7500	0.0000

Fig. 5.10 – IFS – Cruces

Como se observa en la figura 5.10, que intenta sintetizar una cruz etíope, los mapas se marcan con una "L" para que su orientación sea reconocible. La cruz de la derecha, compuesta por decenas de miles de puntos, se compone ubicando en la posición correcta los cinco mapas de la izquierda. Lo que el investigador gana con esto es una valiosa simplicidad: los objetos fractales resultantes se pueden ahora comparar no en sí mismos, sino a través de la relación (algebraica o intuitiva) existente entre sus respectivos mapas.

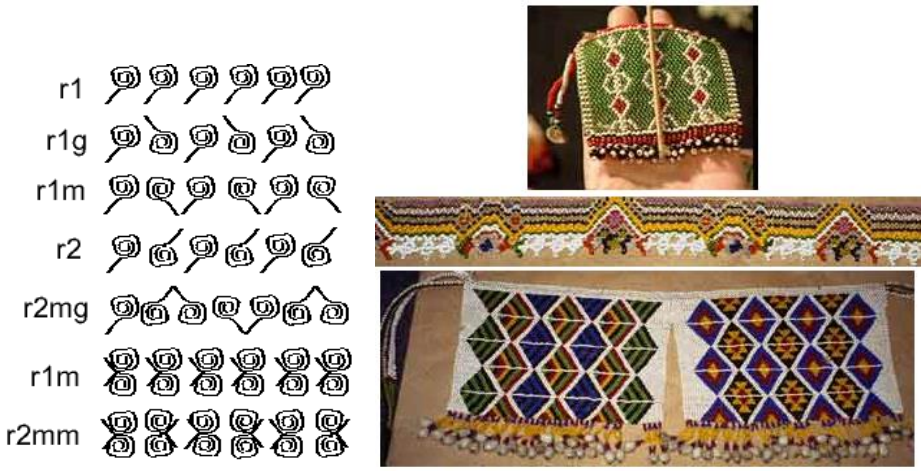


Fig. 5.11 – Patrones de diseño Zulu – Artesanías sudafricanas

A los antropólogos les interesará saber que Chonat Getz de la Universidad de Witwatersrand en Sudáfrica ha creado simulaciones IFS que reproducen patrones de diseño con chaquiras o mostacillas Zulu. La figura 5.11 muestra a la izquierda los patrones de inversión, repetición y traslación que son propios del álgebra de matrices. A la derecha se reproduce

un *iphoco* Xhosa con patrón `r2mm` según la notación de grupos de simetría, una guarda Zulu tipo `r1m` y un *ubeshana* repetitivo Zulu con rotación horizontal. También aparecen diseños fractales en las artesanías en alambre *izimbenge* que se pueden simular con algoritmos determinísticos, IFS y la ecuación llamada *escape time* (Getz 1999). Ron Eglash ha encontrado patrones característicos de IFS en los textiles Kente de Ghana y en edificios institucionales en Casamance, Senegal (Eglash 1999: 218, 219, 222). Eglash documenta además que los nativos poseen una caracterización verbal para diseñar estos patrones y para describir el proceso de percepción de los diseños que mapea con elegancia sobre la receta iterativa y escalar del juego del caos formulada por Barnsley (pp. 74-76).

Aunque trabajar con IFS puede ser técnicamente complicado porque no es fácil hallar un conjunto de transformaciones que produzcan una figura determinada (Falconer 1999: 136), de ahora en más el investigador que necesite indagar, por ejemplo, las configuraciones de herrajes, cestos o tejidos, dispone de una algorítmica que le permite no sólo sintetizarlas, sino compararlas entre sí, modular su tipificación e indagar la lógica de su articulación en el saber etnográfico, su presencia en el espacio y sus transformaciones en el tiempo. Y si no se aplican las fórmulas de los IFS se aplicará alguna otra de las que estamos revisando.

5.2.5 – Systemas-L: las gramáticas recursivas del crecimiento

Ciertos patrones de la naturaleza muestran un aprovechamiento de recursos y una capacidad de adaptación ante restricciones tan perfectos que es dudoso que puedan mejorarse: la maximización de la superficie de la corteza cerebral mediante anfractuosidades, la estructura arbolada de los sistemas circulatorio, linfático y nervioso, los pliegues complejos de los riñones y el mitocondrio, etcétera. Todos estos patrones son fractales estrictos que denotan una capacidad específica de desarrollo y crecimiento. Cuando algo crece y se transforma, las instrucciones para hacerlo deben estar en alguna parte, y lo común es que sean robustas, compactas y simples; en el caso de los sistemas biológicos, el proceso instructivo forma parte del código del ADN. En 1968, el biólogo Aristid Lindenmayer inventó un formalismo que simula esas pautas de crecimiento y lo llamó Sistema-L (*L-System*), donde *L* es la inicial de su apellido (Prusinkiewicz y Lindenmayer 1990).

Un sistema de este tipo consiste de una célula originaria, apropiadamente llamada "semilla" (*seed*), y una descripción para generar nuevos tipos a partir de los anteriores. Actuando como mecanismo generativo, la semilla se redefine entonces como un axioma, y las instrucciones devienen reglas de producción.

Por ejemplo:

Axioma: `B`
Reglas: `B` → `F[-B]+B`
`F` → `FF`

A partir de esas reglas irán generándose cadenas como las siguientes:

Profundidad	Cadena resultante
0	`B`
1	`F[-B]+B`
2	`FF[-F[-B]+B]+F[-B]+B`
3	`FFFF[-FF[-F[-B]+B]+F[-B]+B]+FF[-F[-B]+B]+F[-B]+B`

Los sistemas-L originales de Lindenmayer no generan ninguna figura por sí mismos, sino sólo esas cadenas. Cuando se inventó el formalismo aún no existían los monitores gráficos que hoy son comunes. Unos quince años más tarde, Alvin Smith (1984) les aplicó una interpretación computacional basada en comandos de gráfico de tortuga, un lenguaje que había sido desarrollado por Seymour Papert. Se trataba de un lenguaje muy simple, como que fue desarrollado para que los niños aprendieran a pensar las categorías geométricas; no era otro que el módulo de dibujo del lenguaje LOGO, todavía de moda en aquellos tiempos. Existen diversas formas más o menos elaboradas de sistemas-L, la más simple de las cuales es la que se llama D0L, donde D expresa que el sistema es determinista, y 0 indica que la gramática es independiente del contexto. En su forma más común, los comandos básicos de graficación de un sistema-D0L son los de la tabla que se reproduce en estas páginas.

Comando	Acción
F	Dibujar hacia adelante un número determinado de posiciones
G	Mover la tortuga hacia atrás un número de posiciones, sin dibujar
+	Girar la tortuga hacia la derecha un ángulo determinado. Si se especifica un número entero antes del signo, la tortuga realiza el giro esa cantidad de veces.
–	Idem, hacia la izquierda
[	Guardar la posición y ángulo actual para uso ulterior en una pila de estados guardados
]	Eliminar el último estado guardado en la pila y restaurar la última posición y ángulo guardados
|	Mover la tortuga hacia adelante una longitud computada, dibujando una línea desde la posición anterior hasta la nueva – En algunas aplicaciones, girar 90° o 180°

En el caso del cuadro anterior, el axioma y las reglas generan un árbol, tan frondoso como el número de recursiones establezca. Con un dispositivo que pueda interpretar cada símbolo como una instrucción, las series que se van generando representarían el plan de construcción de una estructura fractal. Si analizamos el ejemplo, veremos que solamente tres iteraciones de la regla producen un resultado complejo; eso da una idea de la magnitud de complejidad que puede esperarse de un simple principio de recursividad. La longitud de una sucesión de este tipo crece en forma sumamente rápida. Aún con la regla de sustitución más simple imaginable, por ejemplo A, A→B, B→AB, el número de letras de cada término sería 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34…, lo cual recibe el nombre de serie de Fibonacci: cada término es igual a la suma de los dos que lo preceden.

Lo que es singular de estos sistemas es que son exactamente análogos a los lenguajes formales que Chomsky definió a través de gramáticas "sensibles al contexto" ya que, de hecho, Lindenmayer se inspiró en la gramática generativa de Chomsky para definir su método constructivo. Como hemos visto al tratar la jerarquía chomskyana, la forma de estas gramáticas es un conjunto de reglas de re-escritura como $A \rightarrow \alpha$, donde A denota un símbolo no terminal que puede ser expandido, y α una cadena arbitraria de elementos que pueden ser terminales o no (Martin 1972; Flake 1999: 83).

Mientras los IFS despliegan simple iteración, los sistemas-L son más elaboradamente recursivos. Incluso para estudiosos formados en las humanidades, experimentar con sistemas-L resulta sencillo y viable. Casi todos los graficadores de fractales como Fractint, Winfract o ChaosPro incluyen prestaciones razonables de esa clase de sistemas. Algunos programas especializados, como LSystem4 o LS Sketch Book, permiten configurar número de iteraciones, gramáticas de complejidad arbitraria, orientación y posición en el espacio tridimensional, texturas y efectos mucho más refinados. Un factor negativo de estas tecnologías es la eventual discrepancia en la notación de las gramáticas entre una aplicación y otra; un engorro, pero no un impedimento.

La figura 5.12 muestra un triángulo de Sierpiński (o de Yanghui) con cinco recursiones de la regla y un árbol con cuatro; en el triángulo, un valor de ángulo asegura la convergencia de los lados en un vértice; en el árbol, ese valor determina la inclinación. La experimentación con programas que generan imágenes a partir de reglas de Lindenmayer contradice, al menos para ciertas clases de representaciones, el dicho popular que afirma que una imagen vale más que mil palabras; por el contrario, gramáticas muy simples engendran objetos gráficos extremadamente complejos. La especificación de las reglas, por otra parte, califica como un método para reducir la arbitrariedad de su descripción y comprobar la similitud estructural de objetos que parecen tan distintos.

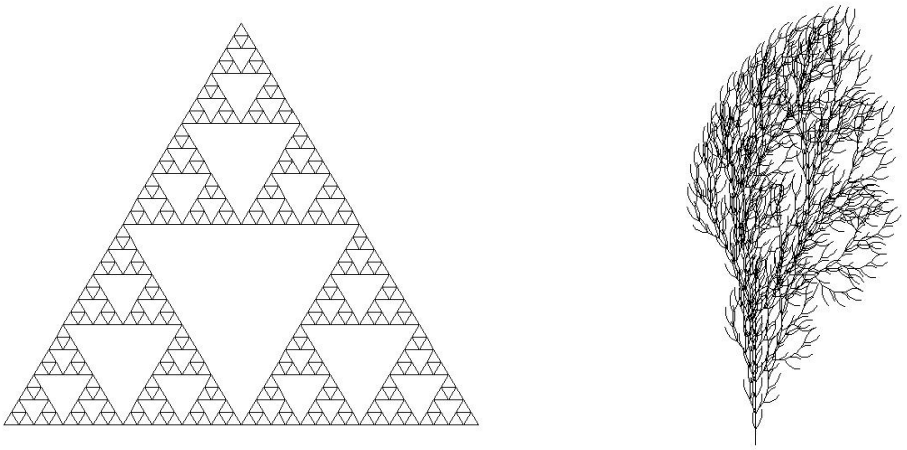


Fig. 5.12 – Sierpiński – Axioma: F-F-F – Regla: F=F[-F]F – Arbol: ++++F F=FF-[-F+F+F]+[+F-F-F]

Los naturalistas y matemáticos han utilizado sistemas-L para modelizar distintas clases de objetos, incluyendo plantas, árboles, arbustos, alfombras y triángulos de Sierpiński, islas de Koch, polvos de Cantor, curvas de Peano, copos de nieve, arabescos, cadenas de Markov. Una vez más, Ron Eglash ha encontrado innumerables patrones recursivos, fácilmente sintetizables y expresables como sistemas-L en diferentes culturas de Africa: aparecen en los ornamentos de las máscaras de las sociedades Dan de Liberia y Côte d'Ivoire, en las trenzas de los peinados de Camerun, en las esculturas en madera de los Bamana de Mali, y en los patrones de asentamiento de los Batammaliba de Togo (Eglash 1999: 109-146). El caso más notable es el de las abigarradas cruces etíopes (p. 136).

Przemyslaw Prusinkiewicz y Jim Hanan (1998) han re-descubierto que los patrones Kolam de Tamil Nadu, en el sur de la India, obedecen a una lógica geométrica idéntica a la de los sistemas-L. Los Kolam (o Rangoli) son diseños en polvo de arroz coloreado que las mujeres usan para purificar y proteger sus casas, y también en tatuajes, pisos y paredes; se los re-

puta muy arcaicos pero están documentados sólo desde el siglo XV. Los estudiosos de la India, matemáticos excepcionales, sabían desde hace décadas que esos diseños obedecen a una gramática regular recursiva.

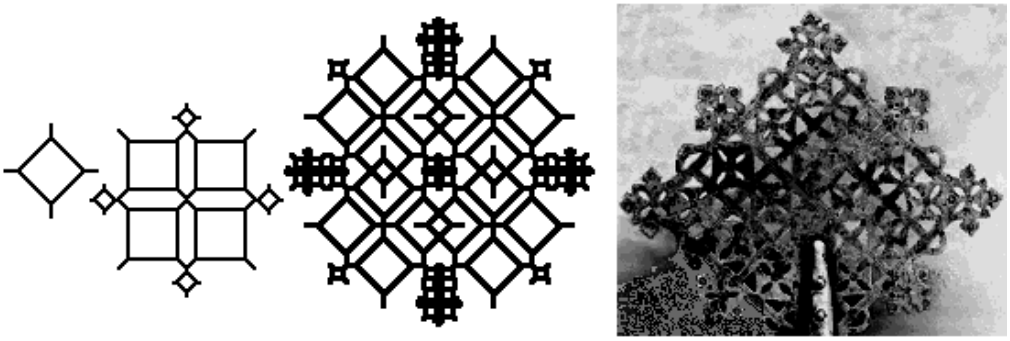


Fig. 5.13 – Cruz etíope – Simulación mediante sistemas-L y ejemplar

Mucho antes que se publicaran los primeros textos sobre fractales, Gift Siromoney y sus colegas habían desarrollado gramáticas de tipo chomskyano para generar diseños Kolam. Insólitamente, aislaron tres tipos distintos de Kolam susceptibles de engendrarse mediante otros tantos formalismos, a los que llamaron Kolam de matriz finita, Kolam de matriz regular y Kolam de arreglo regular independiente del contexto (Siromoney y otros 1974). El hallazgo más teatral, sin embargo, concierne a las técnicas nativas de memorización de los diseños, las cuales se basan en reglas sintácticas recursivas semejantes a las que rigen el método de Lindenmayer. No hay sombras de "analogías inconscientes" ni de automatismos en dichas capacidades y procedimientos, sino un genuino pensamiento matemático, con seguras correspondencias en otros órdenes culturales. La imagen de la izquierda muestra un Kolam Tamil documentado por Prusinkiewicz, llamado "la serpiente", consistente en una sola curva totalmente conexa; la figura de la derecha reproduce un conjunto de diseños Rangoli antiguos y contemporáneos recolectados por el autor, muchos de los cuales son susceptibles de generarse mediante sistemas-L u otros procedimientos de construcción fractal.

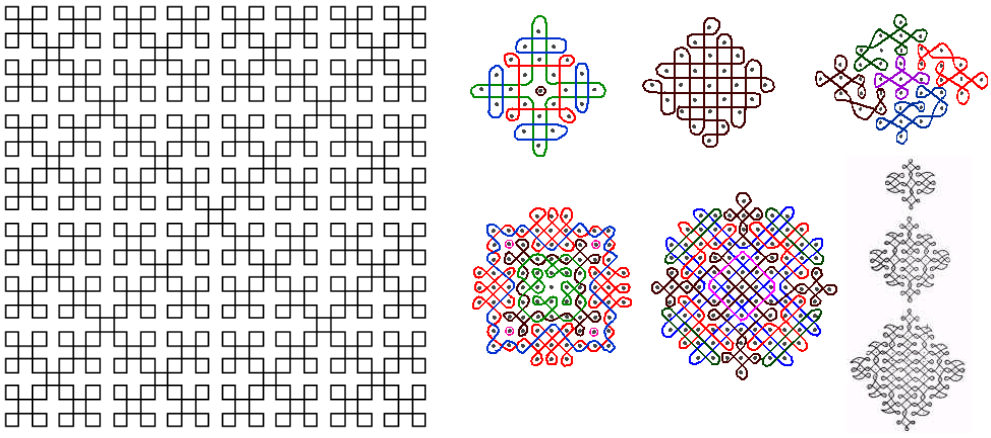


Fig. 5.14 – Kolam Tamil – Diseños Rangoli

Sugiero olvidar por el momento la multiplicidad de imágenes posibles y pensar en los códigos subyacentes, o mejor dicho en las reglas por las que se rigen los códigos mismos. Prusinkiewicz, quien ha trabajado en contacto con Lindenmayer, ha sintetizado partituras musicales y música karnática de la India mediante estas gramáticas recursivas (Prusinkiewicz 1986; Prusinkiewicvz y otros 1989). Un programa bien conocido en Internet, LParser, gene-

ra sistemas-L que otro programa, LMuse, convierte en música siguiendo distintos criterios: la dirección en el espacio, la longitud y el grosor de las líneas se interpretan como altura musical, duración de las notas y volumen; el color se traduce como timbre y las transformaciones estocásticas como variaciones. El resultado, créase o no, suena a música humana. No se trata sólo de imágenes, entonces; con algunos programas de refinamiento mediano como Visions Of Chaos se puede pasar con facilidad de un modo a otro de representación y, por ejemplo, escuchar la música correspondiente a determinados axiomas y reglas que generan un dibujo, o viceversa. Con seguridad, una cierta proporción de patrones culturales (y de sus gramáticas generativas) en cuentos, música, diseños plásticos, patrones de asentamiento o arquitectura, pueden expresarse como reglas recursivas semejantes, ya sea en el análisis que practica el antropólogo o en el saber verbal o pragmático que encapsulan las culturas.

5.2.6 – Mosaicos periódicos y autómatas teselares

Esta clase, que se puede identificar con las figuras repetitivas de Roger Penrose que cubren el plano con mosaicos irregulares o de formas caprichosas, guardan una relación ligeramente conflictiva con la geometría fractal. La mayor parte de los mosaicos periódicos (*tiles*) conocidos en la naturaleza y el arte no cumple con las cinco condiciones estipuladas para calificar como figuras fractales; pero la misma proporción satisface al menos cuatro de ellas. Por definición, los mosaicos periódicos pueden producirse mediante gramáticas equivalentes a los sistemas-L, aunque de hecho son más repetitivos que recursivos. En tanto estructuras iterativas, muchos de ellos pueden ser generados, al menos en teoría, a través de IFS.

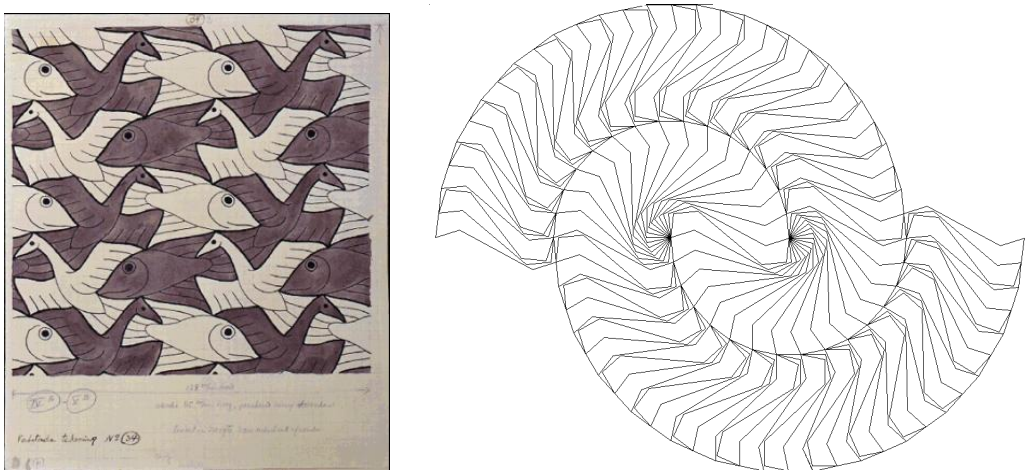


Fig. 5.15 – Mosaico de Escher – Mosaico sintético basado en curvas de Cesàro

Uno de los nombres claves de esta clase de geometría, recurrentemente mencionado en el tratado de Mandelbrot, es el italiano Ernesto Cesàro (Mandelbrot 2003: 71). Las curvas de Cesàro, que son alternativas o transformaciones de la curva de Helge von Koch, se manifiestan en diferentes expresiones artísticas, en diseño industrial y en patrones culturales de diverso origen. Un programa de diseño fractal muy popular en los últimos años, Visions Of Chaos, permite experimentar con cientos de variantes de mosaicos periódicos y curvas de Cesàro en su sección de sistemas-L. De hecho, en el mercado virtual de fractales hay más variedad de ejemplares realizados mediante gramáticas recursivas que con máquinas de copia; estos últimos parecen restringidos a una veintena de formas básicas.

Las formas más simples y ortogonales del principio del mosaico son tal vez los *tartans* escoceses y los *quilts* africanos, europeos o afroamericanos, muchos de los cuales son más caleidoscópicos que propiamente fractales. La expresión por excelencia y la más apreciada del principio constructivo de los mosaicos aperiódicos es, por supuesto, el arte de Maurits Escher. Mandelbrot considera que los embaldosados y teselaciones hiperbólicas de Escher son figuras fractales cuya inspiración (se ha descubierto) procede de matemáticos poco conocidos, como Fricke y Klein, aunque en muchos casos se cree que proceden de teselaciones autoinversas y embaldosados bien conocidos por Poincaré que han entrado a formar parte del reino fractal (Mandelbrot 2003: 43, 242). Las matemáticas involucradas en las elaboradísimas imágenes de Escher no son en sí complejas, y se reducen a nociones de complemento y autoinversión.

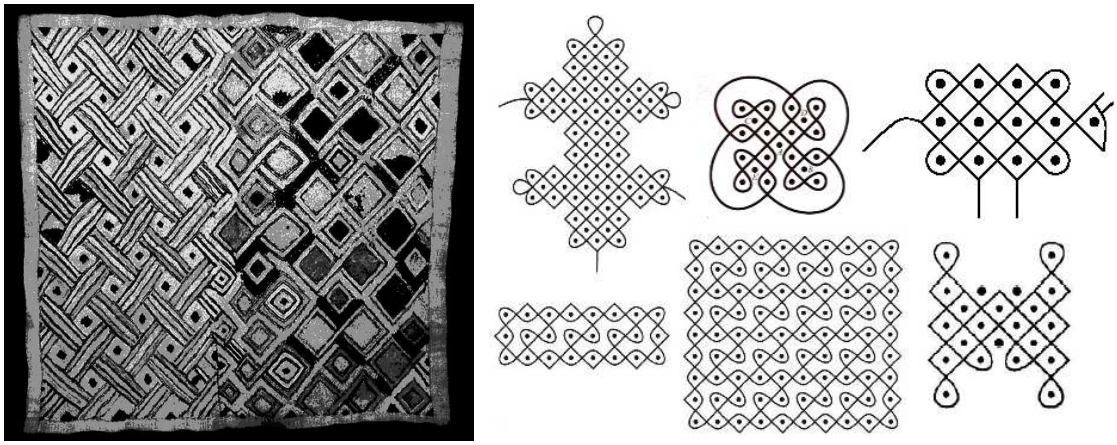


Fig. 5.16 – Textil Showa con teselación modulada – Pinturas *sona* Chokwe

Desde el punto de vista antropológico, los mosaicos sobreabundan en casi todas las formas de representación de las culturas etnográficas de Africa y América. En el estudio de Ron Eglah (1999), se los ve aparecer en las mantas Fulani (p. 119), en los tejidos Mandiak de Guinea-Bissau (p. 44), en las telas de rafia de los Showa (p. 54), en las figuras en arena sona del pueblo Chokwe de Angola (p. 69), documentadas por Paulus Gerdes (1995), que yo encuentro casi idénticas a las del arte Kolam del sur de la India. De hecho, muchas de las configuraciones reportadas en los fascinantes textos de Gerdes sobre geometrías africanas corresponden a este tipo de figuras casi-fractales.

En cuanto a las figuras teselares, se manifiestan típicamente en los patrones que generan los autómatas celulares de las clases más complejas. Como ya se ha visto, esos patrones, a veces extraordinariamente intrincados, son un efecto emergente, siempre sorpresivo, que se originan en principios de construcción muy simples. Cualquier lector puede experimentar la gestación de patrones complejos con programas comunes de autómatas, tales como Capow o Mirek's Cellebration. Clifford Pickover (1990: 295-310) proporciona ejemplos variados de estos diseños, y los vincula con los diseños de las alfombras y tapices persas, los tejidos peruanos precolombinos y las complejas simetrías de las ornamentaciones moriscas. Si bien el tratamiento sintético mediante autómatas permite generar texturas teselares complejas, no existe una correspondencia lineal entre los valores de agentes, las reglas, las vecindades y los rangos como para poder modular deliberadamente la producción de las formas; estructuras semejantes resultan de reglas muy distintas, independientemente de la base numérica que se utilice; los comportamientos pueden variar de manera imprevista conforme al núme-

ro de generaciones (Wolfram 2002). Dada esta no-linealidad, el único método asequible es el de una búsqueda reveladora, pero mayormente a ciegas: un nuevo caso de escenario cien por ciento determinista, pero irreductible a la deducción convencional.

5.2.7 – Fractales clásicos, imaginarios y complejos

El símbolo enigmático de la geometría fractal es, sin duda alguna, el conjunto de Mandelbrot, respecto del cual el propio Benoît ha manifestado orgullo por tener su nombre. Su imagen ha sido comparada con un pollo mal asado, un corazón atacado por un tumor, un ocho con verrugas apoyado lateralmente (Horgan 1998: 249), una cosa indefinible de aspecto enfermizo, erizada de corcovas, chichones, tallos y apéndices (Regis 1987: 92), o una isla con espirales y cabellos y con un decidido toque orgánico (Flake 1999). Aunque pocos saben a ciencia cierta qué es lo que modeliza, se lo reconoce universalmente como el objeto más complejo de las matemáticas (Dewdney 1985), la figura geométrica más compleja que jamás haya existido, o como la más compleja que puede llegar a existir sobre dos dimensiones, aunque sólo asintóticamente sea bidimensional. De hecho, la imagen no es el icono de ninguna cosa; es absolutamente platónica y abstracta, y resulta de aplicar una y otra vez la ecuación $z=z^2+c$, siendo c un número complejo. Cada punto del fractal de Mandelbrot representa a su vez la conducta de un conjunto de Julia.

5.17 – Dorso del espejo celta de Desborough – Patrones de ornamentación del Estilo V

Aunque cabría esperar que por su complejidad inherente no existan objetos culturales que se le asemejen, de hecho éstos abundan, lo cual es insólito. El más extraordinario de esos objetos puede que sea el famoso espejo de Desborough, Northamptonshire, fabricado por los celtas de la edad de hierro tardía (período de La Tène III) entre 50 AC y 50 DC, reproducido en la figura 5.17 a la izquierda. Perteneciente al llamado Estilo V, preciosista hasta el punto de decadencia, fue descubierto en el siglo XIX y se conserva hoy en el British Museum. Hay quien asegura que se trata de la primera manifestación de arte fractal, en el sentido contemporáneo de la palabra. Un especialista en estas geometrías no dudaría en clasificarlo como un fractal de tipo "tiempo de escape", basado en la función lambda, originado en variantes del conjunto de Julia. Los especialistas en geometría compleja han señalado,

además, que sus grupos de círculos tangentes ilustran varias de las ocho soluciones posibles al conocido problema geométrico de Apolonio, el cual dista de ser trivial (Kasner y Newman 1985: 24-25; Wolfram 2002: 43, 873).

En el arte celta existen cientos de piezas que poseen diseños semejantes, como el escudo de Battersea, o los dorsos de espejos de la figura de la derecha, conocidos como Mayer, Colchester, Birdlip, Holcombe, Old Warden y Great Chesterford, similares a variantes de los fractales de Mandelbrot, Julia o Newton, y con curvas de una perfección absoluta; patrones similares aparecen en las artes de los vikingos, escitas, avar-onogurios, partos, sogdianos, chinos y japoneses (Bérczi 1999), todas ellas virtualmente inexploradas en sus principios geométricos. En el arte abstracto de principios del siglo XX hay algunas increíbles anticipaciones de regiones fractales del conjunto de Mandelbrot/Julia, en particular en la serie de pinturas *Amorpha* de 1912 del checo František Kupka, y por supuesto en el arte psicodélico de la década de 1960.

En Africa, Ron Eglash ha documentado patrones de asentamiento y otras construcciones con estructuras recursivas y homotéticas que muestran las auto-similitudes propias de los fractales complejos. La imagen de la figura 5.18 corresponde a una síntesis fractal de corrales (*kraal*) Ba-ila de Zimbabwe, a partir de una fotografía tomada antes de 1944, cuando todavía el país se llamaba Rhodesia (Eglash 1999: 27). Una estimación realizada sobre esa imagen con el programa Fractal Analysis arrojó una dimensión fractal de 1.36; utilizando HarFa, con un método más preciso, resultó 1.51. Otras estructuras semejantes, aún más abigarradas y reminiscentes del arte fractal contemporáneo basado en el conjunto de Mandelbrot, se presentan en la aldea de Mokoulek en Cameroon (p. 30), en la de Labbezanga en Mali (p. 32) y en las casas de los Nankani en Burkina Faso (p. 33).

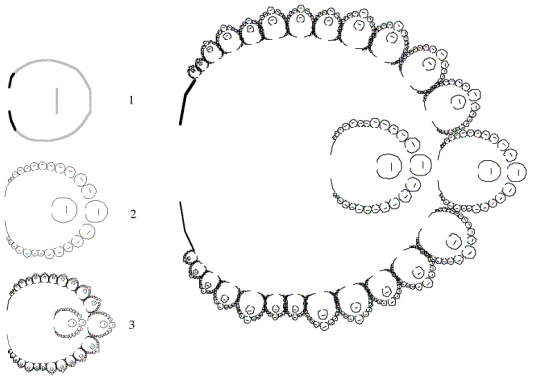


Fig. 5.18 – Kraal Ba-ila de Zimbabwe

Con las excepciones señaladas, la bibliografía sobre estas estructuras dejar mucho que desear en cuanto a desentrañar el pensamiento geométrico nativo o las técnicas de aprendizaje y ejecución de un arte consistente en semejantes formas. En Occidente hay mucho que aprender de los trabajos de Gift Siromoney a los que me he referido más arriba. Fuera de ellos, abundan las interpretaciones esotéricas que vinculan esas extrañas imágenes con arquetipos primordiales, mundos de sueño y signos iniciáticos, y no se tienen remilgos en cuanto a vincular expresiones artísticas con el "esquema cósmico" fractal, señalando, por ejemplo, la similitud entre el contorno de la isla de Mandelbrot (la tierra mágica de Tor'Bled-Nam, como la llama Penrose) y las formas de la Venus de Willendorf. Es lamentable que en un terreno tan interesante el esoterismo lleve la delantera. Buena parte de las

expresiones etnográficas o arqueológicas de todo el mundo todavía está aguardando un estudio adecuado a la luz de estas geometrías.

5.2.8 – Atractores extraños y biomorfos

Los atractores fractales son todos extraños y también recíprocamente. El concepto de atractor extraño fue introducido por David Ruelle y Floris Takens (1971) pocos años antes que se gestara la ciencia del caos, por lo que algunos consideran que fueron esos autores europeos quienes realmente fundaron esa disciplina en el contexto de los estudios de turbulencias (Aubin 1998). Los atractores fractales más abstractos (Gumowski Mira, Hénon, Ikeda, Ueda, Rossler), así como los ultrafractales hipercomplejos de más alta dimensionalidad, despliegan formas sugerentes que los artistas fractales han sabido explotar.

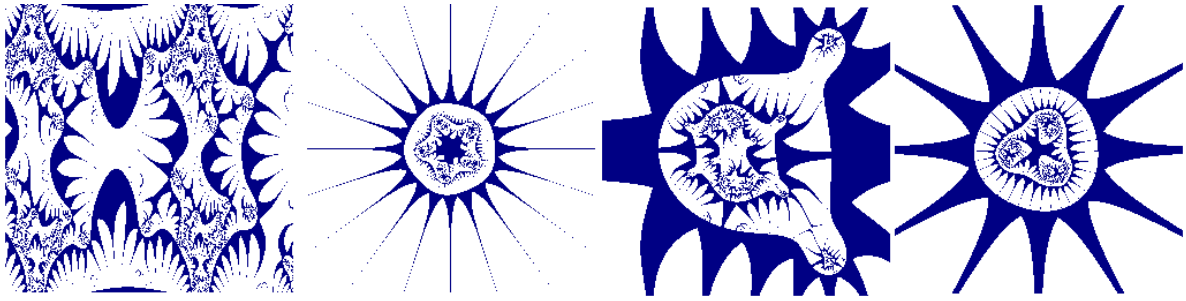


Fig. 5.19 – Biomorfos de Pickover

Hay otro género de fractales que evoca formas orgánicas de seres unicelulares bien conocidos, como los de la fig. 5.19. Estas figuras fueron descubiertas simultáneamente hacia 1986 por Clifford Pickover a partir de un error de tecleado y por Richard Dawkins combinando parámetros en sus modelos de simulación. Los modelos de Dawkins producen formas seudobiológicas genéricas, con estructura de monigotes lineales; las funciones de Pickover resultan en organismos unicelulares identificables: vorticellas, algas verdes, tripanosomas, foraminíferos, plasmodios, diatomeas; los fractales de este género se conocen como biomorfos y constituyen una variante de los conjuntos de Julia (Dawkins 1986; Pickover 1986; Segarra 2001: 184-188). Hay toda una familia de funciones que invariablemente engendran formas reminiscentes de protozoarios; la primera y la tercera imagen de la serie, por ejemplo, se asemejan a ciliados del género *Euplotes*, y surgen de la función $sen(z)+e^z+c$ y $sen(z)+z^2+c$ respectivamente, siendo c un número complejo; el interior de la segunda es un paramecio creado con z^5+c y la cuarta un *Astrodisculus* correspondiente a z^3+c. Valores de parámetro distintos resultan en formas que un buen zoólogo puede identificar, señalando motivos gráficos que corresponden a aparatos de Golgi, folículas, gástrulas, blástulas, mórulas, cilias y cosas por el estilo. Por más que la similitud de esas criaturas con sus contrapartes naturales "sea más en espíritu que en detalle", el hecho es que las formas simétricas derivadas de z^z se parecen a larvas ciliadas, las estructuras radiales de 12 brazos generadas con z^3 son similares a Sarcodinas y otras funciones sugieren equinoides fósiles, anémonas o estrellas de mar (Pickover 1990: 107). Naturalmente, ha habido mucha especulación tratando de explicar la analogía entre los gráficos de esas funciones y la estructura de esas especies, pero no existe ninguna explicación satisfactoria hasta la fecha.

Se puede comprender la lógica de generación de esos atractores y biomorfos utilizando programas tales como Chaoscope, Salomo, Raimuraito o Winfract. Fuera de algunas piezas de

arte biomórfico de Vassily Kandinsky, Alexander Calder, Isamu Noguchi, Hans Arp, Mark Rothko, Yves Tanguy, Joan Miró u otros artistas plásticos o virtuales, no he sido capaz, sin embargo, de encontrar fenómenos culturales que se les apliquen. Muy probablemente algunas funciones matemáticas de uso antropológico generen esta clase de figuras como artefactos de la investigación, antes que como representación de los rasgos observables de sus objetos. Pero todo esto es terreno virgen. Por más que muchos afirmen que nos encontramos en las puertas de una nueva epistemología iconológica, los antropólogos estamos lejos de poder imaginar posibles interpretaciones de esos atractores y organismos virtuales.

5.2.9 – Patrones fractales en Arqueología y Antropología Sociocultural

Un pequeño porcentaje de las conferencias y *papers* de computación aplicada a la arqueología y a la antropología cultural presenta conceptos ligados con la geometría fractal, con resultados sugerentes pero todavía modestos. Se diría que los especialistas enfrentan tres situaciones problemáticas, que son (1) la falta de ejercicio en reconocer una determinada familia de formas como representativa de una geometría fractal, (2) la escasez de colecciones y ejemplares que señalen la presencia de esa clase de diseños en gran número de sociedades, (3) la inexistencia de una etno-matemática que indague, desde el trabajo de campo, las problemáticas ligadas al conocimiento nativo de esas geometrías en tanto tales, más allá de los simbolismos, asociaciones cosmológicas y significados que se reportan habitualmente.

Todavía resta lo más sustancioso de la investigación; los antropólogos deberán afrontar no pocos dilemas: Si en una cultura viva los artesanos generan fractales ¿Cómo se realiza la elicitación de su conocimiento? ¿Cómo se expresan la recursividad y la homotecia en un lenguaje que carece de esos conceptos, igual que carecíamos nosotros de ellos antes de Gödel y de Mandelbrot? ¿Qué correspondencias existen entre esas estructuras relacionales y otros aspectos de la sociedad y la cultura? ¿Qué patrones distintivos caracterizan a qué sociedades? ¿Cómo evolucionan esos patrones en el tiempo, y cómo se puede describir matemáticamente esa evolución? ¿Cómo se pueden utilizar las funciones y gramáticas generativas de la geometría a efectos comparativos y clasificatorios? Aunque todavía hay mucho por hacer, estimo que la geometría fractal aporta a la disciplina por lo menos una nomenclatura inicial y algunos principios ordenadores para un área en la cual los antropólogos antes sólo contábamos con una intuición amorfa, incapaz no sólo de encontrar respuestas sino de plantear preguntas de interés.

A pesar que las investigaciones fundamentales siguen pendientes, algún progreso se ha hecho en las últimas décadas. Dos expertos en ciencias de la computación y dos arqueólogos de Londres, D. Rees, G. G. Wilkinson, Clive Orton y R. Grace (1988) utilizaron la idea de dimensión fractal para analizar imágenes gráficas de microdesgaste de instrumentos arqueológicos, prestando atención a los complejos patrones de texturas. Por lo que infiero de su sucinta documentación, la escala de texturas y convoluciones se puede contrastar y modular a través de una gramática recursiva análoga a la de los Sistemas-L, o mediante fractales de desplazamiento al azar de punto medio similares a los plasmas. De hecho, los métodos fractales se están comenzando a utilizar regularmente junto a las técnicas tradicionales de análisis y síntesis de textura: los procedimientos estadísticos (matrices de co-ocurrencia, funciones de correlación), los geométricos (teselaciones de Voronoi), los estructurales, los modelos de campo aleatorio, los de procesamiento de señales (filtros de dominio espacial, de Fourier, de Gabor y *wavelets*) y, por supuesto, los autómatas celulares. Dos de los algo-

ritmos fractales más utilizados en los últimos tiempos para generar o analizar turbulencias y texturas variadas son el ruido de (Ken) Perlin y la suma fractal o movimiento fraccional browniano, incluidos en muchos programas sintetizadores de pátinas y efectos. El lector interesado en estas problemáticas puede consultar la magistral síntesis de Mihran Tuceryan y Anil Jain (1998). Hasta donde me consta, todo este espacio es aún terreno virgen para los arqueólogos, incluso para la vanguardia de los especialistas de Oxford.

Otros ingleses, William Cavanagh y Robert Laxton (1993) analizaron las relaciones entre la ley de Zipf, la dimensión fractal y las magnitudes de asentamientos arqueológicos al oriente de Esparta. Los españoles Angel Rodríguez Alcalde, Carmelo Alonso Jiménez y Julián Velázquez Cano (1995), respectivamente un prehistoriador, un ecólogo y un especialista en magnetismo, aplicaron el concepto de dimensión fractal combinado con técnicas de percolación para investigar la neolitización de la cuenca occidental del Mar Mediterráneo; estos estudios se encuentran todavía en desarrollo. También Mark Lake, del University College de Londres, ha utilizado alternativamente técnicas fractales y de percolación en sus modelos de GIS históricos y arqueológicos. El UCL es también el lugar de trabajo del grupo de Michael Batty, cuyas contribuciones al estudio de la dinámica urbana en términos de fractales los antropólogos deberían consultar alguna vez (Batty y Longley 1994).

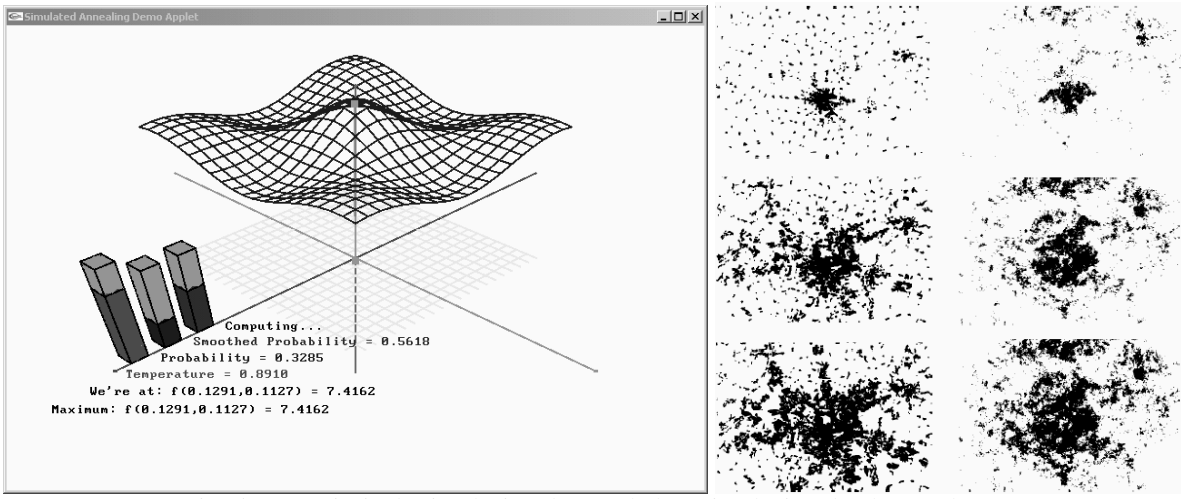


Fig. 5.20 – Paisaje de simulación de templado y simulación de planta urbana

Poco a poco está cristalizando una "teoría de los paisajes" en la que convergen las colinas y valles del espacio de búsqueda de los algoritmos genéticos, las rugosidades del paisaje de adecuación de la memética, los paisajes epigenéticos de Waddington, los potenciales de energía de los sistemas hamiltonianos, los relieves configuracionales del método de simulación de templado, las topologías catastróficas de Thom y las cuencas de atracción de las redes booleanas o los sistemas dinámicos. Algunos de esos paisajes abstractos están ligados a métodos para escalar colinas (*hill climbing*), otros simulan espacios gravitacionales en los que se persigue el descenso a los óptimos mínimos (Axelrod 1997: 74-81). Tanto los paisajes virtuales como los reales resultan ser de estructura fractal, exhibiendo distribuciones de ley de potencia, ruido 1/*f*, autosemejanza, independencia de escala y criticalidad auto-organizada. La figura 5.20 reproduce a la izquierda un paisaje abstracto correspondiente a un proceso de simulación de templado, ejecutado por el autor en Anneal de Alberto Moreira, uno de los programas disponibles en el dominio público; puede observarse además su similitud con las superficies topológicas de la teoría de catástrofes. A la derecha se muestra el

correlato entre los patrones fractales de una ciudad real (Berlín) y su simulación con técnicas de filtrado según Makse y otros (1998).

En materia topográfica, una región fractal por excelencia en el panorama arqueológico parecería ser Mesoamérica. Clifford Brown y Walter Witschey (2002) percibieron y tipificaron configuraciones fractales en los antiguos asentamientos mayas de Yucatán. Los autores afirman que los asentamientos Maya son fractales en una variedad de respectos. Esta concepción, estiman, no es incompatible con el llamado Central Place Model de los geógrafos que estudian la dinámica de las ciudades. Sandra Arlinghaus (1985, 1993), por ejemplo, ha demostrado que las grillas del Central Place, particularmente las hexagonales, son fractales perfectos. Las jerarquías de asentamiento que obedecen a la regla de rango-tamaño son asimismo fractales porque esa regla es una relación fractal bien conocida (Cavanagh y Laxton 1994; Laxton y Cavanagh 1995). La relación de tamaño-frecuencia para sitios en muchos asentamientos, incluyendo algunos de las Tierras Bajas Mayas, es un fractal que corresponde a la distribución de ley de potencia, igual que los procesos de criticalidad auto-organizada: se presenta un patrón de frecuentes sucesos minúsculos y pocas transiciones mayores (De Cola y Lam 1993:17-19). Además, Brown (1999) sostiene que los patrones de asentamiento intrasitio de las tierras bajas son estricta y matemáticamente fractales, y que esta fractalidad se vincula estructuralmente con el sistema de parentesco Maya, que es descripto por los actores nativos en términos de auto-similitud y recursividad.

En las investigaciones relacionadas con fractales, las nuevas ideas parecen penetrar con mayor facilidad en la arqueología que en la antropología sociocultural. Aún así, he debido dejar de lado el comentario de varias docenas de reportes arqueológicos, dado que en muchas ocasiones los estudiosos se dan por satisfechos con descubrir la naturaleza fractal de un perímetro de asentamiento o una planta urbana, a veces a medio excavar, acabando el trabajo en el punto en que debería iniciarse. No se sistematiza el hallazgo estableciendo correspondencias o contradicciones con otros patrones de la misma cultura; no se indaga la historicidad de las formas; no se investiga si la planta fractal satisface optimizaciones logísticas del espacio, si meramente se pliega al terreno, si responde a mapas cognitivos o si sirve a razones simbólicas; no se comparan las características del caso con otros modelos geométricos de regiones vecinas; y, en suma, no se da continuidad a la investigación convencional restante, como si el hallazgo de un fractal más para la colección fuese el objetivo científico esencial. Esta actitud cientificista amenaza constituirse en moda en la arqueología norteamericana reciente (Linda Manzanilla, comunicación personal). En un estudio reciente he señalado los problemas involucrados en el concepto de dimensión fractal en la investigación empírica (Reynoso 2005). No sólo en ciencias sociales se presentan estos problemas, sino que hay conocidos desfasajes de origen entre el atractivo de las configuraciones observables y la falta de "una base teórica más sustancial en la cual la forma geométrica se deduzca a partir de los mecanismos que la producen" (Kadanoff 1986: 7). En estas condiciones, habrá que ver si a la larga se aprovechan las oportunidades que brinda el formalismo, o si éste acaba siendo más perjudicial que beneficioso para la práctica disciplinaria.

En otras disciplinas humanas, la geometría fractal está consolidada desde hace años. Casos a cuento son los estudios de arte de orientación geométrica, la geografía humana y la arquitectura. El número de textos es demasiado grande para proporcionar aquí su referencia. Merecen mencionarse, sin embargo, los estudios más recientes de Paulus Gerdes (1995; 1999), vicecanciller de la Universidade Pedagogica de Mozambique, que describen las variadas y

complejas geometrías del arte africano, muchas de las cuales son de naturaleza fractal; también resultan estimulantes los estudios de Craig Kaplan (2000), autor del programa Taprats, sobre los intrincados patrones islámicos en estrella, así como el erudito análisis de Szániszó Bérczi (2000) sobre el principio de Katachi o invariancia estructural en el arte eurasiático. A Bérczi le debo la clasificación de la figura 5.21, que ilustra patrones en guarda fractales de Hanti-Manysi, Hungría, incluyendo su notación conforme a las simetrías de la teoría de grupos. A la derecha de la figura he incluido un conjunto de paneles en estrella basados en el embaldosado arquimedeano, típicos de la ornamentación musulmana generados con Taprats. Estimo que en un par de días un estudiante podría sintetizar esas formas mediante sistemas-L o utilizando el programa Tess, o producir variantes para analizar, como hipótesis de trabajo, hasta dónde llegan las gramáticas culturalmente aceptables. Al lado de Gerdes, Kaplan y Bérczi una antropóloga, Dorothy Washburn, ha estado también examinando cuestiones de geometría en la cultura, pero sin vincular las simetrías con los fractales (Washburn y Crowe 1988; 2004).

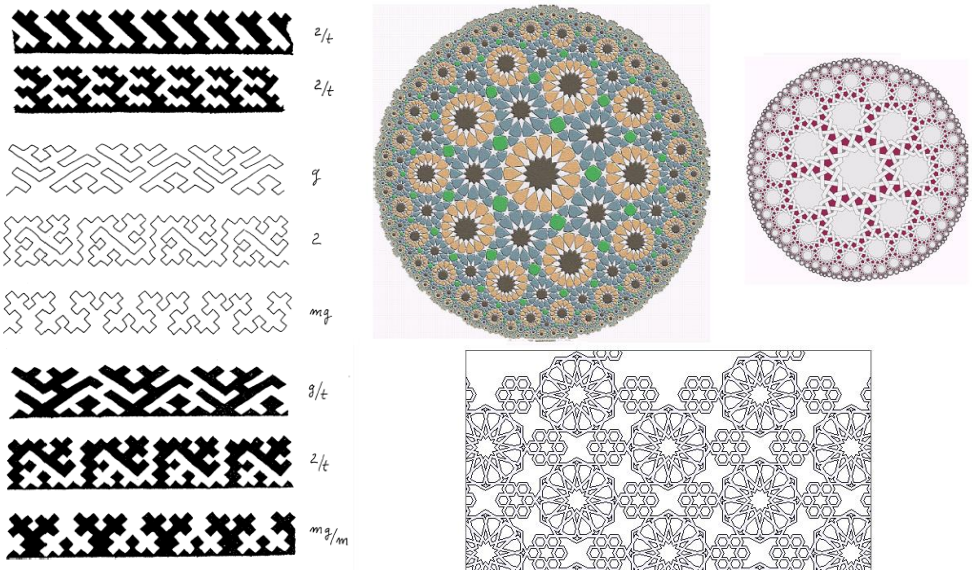


Fig. 5.21 – Mosaicos Hanti-Manysi – Diseños islámicos en estrella

Es evidente que recién se están desentrañando las relaciones entre los principios fractales y otras ideas geométricas y matemáticas, como las que tienen que ver con la sección áurea, la teoría de grupos, los patrones en estrella y los embaldosados. A impulsos de Internet se ha avanzado mucho en este terreno, aunque todavía no se ha deslindado debidamente (por ejemplo) el vínculo entre los diseños fractales, los patrones simétricos de los autómatas celulares, los pavimentos góticos de Cosmati, los ocho tipos de frisos de John Conway o las 17 simetrías del álgebra de grupos fijadas por Evgraf Fedorov hacia 1891 y luego canonizadas por George Polya, pero desde mucho antes conocidas y sistematizadas por los artistas musulmanes en la Alhambra. En estas coordenadas es donde se percibe que las especialidades disciplinarias han estado más distanciadas de lo razonable.

Sólo a partir de mediados de la década de 1990, la dinámica no lineal y las matemáticas de la simetría, junto con el estudio de las capacidades creativas de la computación genética y de la vida artificial, que parecían ser campos referidos a mundos distintos, comenzaron a encontrar vínculos y patrones de interés común; es evidente que todavía no se han elaborado los recursos teóricos, las bases de conocimiento y los instrumentos correspondientes a e-

sa convergencia (Field y Golubitsky 1995; 1996). Esta falta de sincronización hace que los antropólogos que estudian artes geométricas propongan denominaciones idiosincráticas de figuras, motivos y transformaciones, en vez de recurrir al fondo disciplinario relevante y utilizar la nomenclatura matemática que sería de rigor. En consecuencia, nadie sabe cuáles de todas las simetrías posibles se encuentran en América indígena, o cuales están ausentes, y así sucede con casi todo.

A esta altura del desarrollo tecnológico y conceptual, ya no hay razón para que este estado de cosas se perpetúe; si bien las clases de formas iterativas existentes son numerosas, el orden de esta numerosidad es conceptualmente manejable, los rudimentos son fáciles de aprender y las herramientas abundan. Imagino que si la antropología del arte aprovecha las facilidades que hoy están a la mano, dispondrá de mejores capacidades descriptivas y criterios de sistematización. En este proceso no se encontrará seguramente nada que se parezca a una ley, pero se podrá saber con mejor fundamento qué es lo que vincula a una cultura con otra en materia de diseño geométrico, o qué variaciones y giros idiosincráticos definen su carácter especial. Con las técnicas en su lugar y los métodos adecuados al objeto, las hipótesis de trabajo vendrán solas.

Al acercarse el punto de clausura de esta sección, percibo una vez más que el predominio de los objetos euclideanos en la cultura y de las formas fractales en la naturaleza nos devuelve a preguntas formuladas por Gregory Bateson (1980: 3-20) y Jacques Monod (1985: 17-20): ¿cómo sabe uno si un objeto es cultural o natural? Salvo la música, los fractales culturales son infrecuentes; salvo los cristales, las burbujas y los cuernos, las formas euclideanas casi no ocurren en el mundo natural. En pleno siglo XXI, Stephen Wolfram afronta y trata de explicar esta dualidad y contesta a Bateson sin haberlo leído: la mayoría de los objetos naturales poseen formas más intrincadas que las de los artefactos; cuando aparecen objetos anidados, recursivos y homotéticos en la cultura, desde la pintura en arena a los autómatas celulares, cabe descartar toda coincidencia o espontaneidad: se requieren restricciones y gramáticas capaces de generar, en base a principios simples, esas formas revueltas (Wolfram 2002: 828-835, 1183-1184). Toda forma o proceso complejo pertenece a una clase de universalidad característica, para tratar la cual se han propuesto unos cuantos modelos transdisciplinarios. Pocos años atrás nada sabíamos de todo esto, aunque el mismo Bateson ya lo había intuido:

> Él buscaba la "pauta de conexión" … para llegar a la cual es necesario desechar una enorme cantidad de diferencias superficiales: la realidad que buscaba Gregory era matemática o casi matemática. En última instancia le importaba poco si el objeto de estudio era el pueblo Iatmul de Nueva Guinea, la esquizofrenia o el aprendizaje de los delfines, porque se podía encontrar la misma pauta formal en distintos conjuntos de información (M. C. Bateson 1989: 81-82).

Aunque desechar las diferencias superficiales puede ir en contra de la razón de ser de la disciplina misma de la antropología, la percepción universalista de Bateson no deja de ser sorprendente. A muchos pensadores se les otorgó un premio Nobel por mucho menos que por eso.

Los estudios sobre la relación entre antropología y geometría fractal no serían lo mismo si no se hubiera publicado *African fractals* de Ron Eglash (1999), a quien conocí en la Universidad de California en Santa Cruz en 1992, cuando estaba gestando su estudio. Me he referido a ese texto tantas veces que ya no hace falta comentarlo por separado. Vale tanto

por su brillo expositivo como por sus hallazgos, pero es más importante aún como piedra fundamental de una nueva forma de plantear la descripción de los patrones y su conexión con el pensamiento nativo. A partir de ese texto se han multiplicado visiblemente las investigaciones en etnomatemáticas, y al menos para quienes participaron de la experiencia, las mismas culturas estudiadas están percibiendo su patrimonio y su saber de otra manera. Así como antes afirmé que la etnografía de los juegos debería escribirse nuevamente en base a lo que hoy se conoce de sistemas complejos y autómatas celulares, estimo que los arqueólogos y antropólogos socioculturales tienen mucho que ganar si incorporan al menos rudimentos de geometría fractal en la descripción de sus estudios de casos, en sus metodologías comparativas y en la búsqueda de las pautas que conectan en el campo de una nueva antropología de la complejidad.

6. Conclusiones

> Una teoría general de los sistemas complejos debe ser necesariamente abstracta. Por ejemplo, una teoría de la vida, en principio, debe ser capaz de describir todos los escenarios posibles para la evolución. … Este es un paso extremadamente delicado. Cualquier modelo general que podamos construir no debe tener ninguna referencia específica a especies concretas. El modelo, tal vez, no deba referirse siquiera a los procesos químicos básicos, o a las moléculas que son parte integral de la vida como la conocemos. ¡Debemos aprender a liberarnos de ver las cosas tal como son! ¡Una perspectiva científica radical, por cierto! Si, siguiendo los métodos científicos tradicionales, nos concentramos en la descripción adecuada de los detalles, perdemos perspectiva. Una teoría de la vida es probable que sea una teoría de un proceso, y no una crónica detallada de detalles profundamente accidentales de ese proceso, tal como el surgimiento de la especie humana.
>
> PER BAK (1996: 10)

A lo largo de este libro se han examinado formas lógicas y estructuras algorítmicas que instancian y pueblan la tabla periódica de la tipología de modelos que propuse al principio. Sin duda hay todavía mucho por hacer en términos formales y sustantivos para situar las ideas de la complejidad en ese marco; la epistemología constituida, cristalizada ya sea a favor de los arquetipos nomológicos-deductivos o en su contra, ha permanecido confinada en las modalidades históricas y no nos sirve de gran ayuda en esta coyuntura. Por eso es que la tabla que se ha venido concertando, en la que algunos ejemplares todavía se deslizan de una posición a otra a medida que se conocen mejor sus consecuencias y sus matices, no puede más que ser provisional.

La finalidad de esta investigación, a fin de cuentas, no ha sido constituir la matriz, sino caracterizar un paradigma de lo complejo que ocupa una región particular, relativamente poco conocida, en el campo de las ideas posibles. Conforme a los criterios que aquí he planteado, no cabe duda que las clases modélicas esenciales se nuclean en torno a los tres tipos propuestos al principio de este libro. Aún en ciencias de la computación, donde la epistemología no suele ser explícita, hoy se reconoce que hay sólo tres formas mayores de resolver un problema. En un texto que resume el estado de arte de la computación evolutiva escribe Heinz Mühlenbein, por ejemplo:

> El objetivo de la computación evolutiva es hacer más fácil el desarrollo de programas poderosos de resolución de problemas. Se han intentado tres clases de estrategia para alcanzar ese objetivo:
>
> 1. **Usar una teoría** – Desarrollar una teoría de resolución de problemas e implementarlo en una computadora.
> 2. **Copiar el cerebro** – Analizar el cerebro humano y hacer una copia de él en una computadora.
> 3. **Copiar la evolución natural** – Analizar la evolución natural e implementar las fuerzas evolutivas más importantes en una computadora (Mühlenbein 2004:5).

También en la teoría sintrópica de Luigi Fantappiè, un marco muy distanciado del molde estándar, se distinguen los fenómenos de equilibrio, los entrópicos y los sintrópicos, que según su descripción equivalen a los mecánicos, estadísticos y complejos (Arcidiacono y Arcidiacono 1991). Heinz von Foerster (1991: 40), con quien rara vez estoy de acuerdo, identifica asimismo sistemas mecánicos, termodinámicos y auto-organizadores; Mario Bunge (2004: 111-146), a su vez, diferencia entre modelos individualistas, holistas y sistémicos, y aunque la especificación de cada cual es algo excéntrica el esquema coincide en líneas generales con lo que aquí se propone.

Reynoso	Maruyama	Chomsky	Wolfram	Kauffman	Langton	Geometrías y Algoritmos
Modelos Mecánicos – Programación lógica	Causales no recíprocos	Autómatas finitos – Lenguajes independientes del contexto	AC Clase I: Punto fijo AC Clase II: Periódicos	$K = 1$	AC Fijo, AC Periódico $\lambda < 1/3$	Euclideana, ecuaciones lineales, trazas de recurrencia periódicas, microsimulación, simplicidad, equilibrio
Modelos Estadísticos – Conexionismo	Independientes de los sucesos	Autómatas ligados – Gramáticas sensibles al contexto	AC Clase III: Caóticos	$2 < K \leq N$	AC Caótico $\lambda > 2/3$	Fractales estocásticos, ruido blanco, trazas de recurrencia homogéneas o abruptas, complejidad algorítmica, cerca del equilibrio
Modelos Sistémicos – Sistemas complejos adaptativos	Homeostáticos con bucles causales – Morfogenéticos con bucles causales	Máquinas de Turing – Lenguajes no restringidos	AC Clase IV: Complejos – Atractores extraños	$K = 2$	AC Complejo $\lambda \approx ½$	Caos y Fractales determinísticos, ruido $1/f$, algoritmo genético, trazas de recurrencia estructuradas, complejidad determinista y agregada (emergente), lejos del equilibrio

Tabla 6.1 – Tipos de modelos, autómatas y atractores

En la tabla 6.1, en que he consolidado las estructuras paradigmáticas actuales con la taxonomía originaria de Warren Weaver (1948), hay que tener en cuenta unas pocas idiosincracias de nomenclatura: lo que Stephen Wolfram (1984) llama caótico es para mí aleatorio; lo que él llama complejo, otros autores lo consideran caótico. Por más que Morin llame a lo suyo "complejo", su complejidad cae de lleno en el ámbito de los modelos estadísticos, pues incluso sus elaboraciones sobre recursividad y auto-organización sucumben bajo el peso que él confiere a la indeterminación y el azar. Pero la mayor parte de las elaboraciones epistemológicas concuerdan con el arreglo esencial: los objetos de la simplicidad organizada son mecanismos, los de la complejidad desorganizada son agregados, los de la complejidad organizada son sistemas. Las teorías y algoritmos de la complejidad y el caos definen micro-clases de universalidad que concurren hacia este tercer tipo. La escala de los modelos mecánicos es la de las piezas individuales, la de los estadísticos es la totalidad y la de los modelos complejos es un factor de *scaling* variable, a determinar conforme a la teoría (Kadanoff 1999: 157-366).

Al disponer las instancias en ese espacio tripartito surgen unas cuantas constataciones significativas: las estrategias evolutivas y genéticas, por ejemplo, que durante un siglo se consi-

deraron características del reduccionismo mecanicista, al involucrar tiempo, retroalimentación, emergentes, caos, criticalidad auto-organizada e irreversibilidad (y por supuesto vida), revelan ser una forma idiosincrática de las ciencias de la complejidad, además de su heurística maestra (Goldberg 1989; Holland 1992; 1995; 1998; Waldrop 1992: 256-258, 262-265; Flake 1999: 339-424). En psicología y antropología cognitiva, la ruidosa irrupción mediática de la psicología evolucionaria de John Tooby y Leda Cosmides (1992), con la que comulgan pensadores tan influyentes como Steven Pinker (1997) o Daniel Dennett, se funda en la respetabilidad que ha ganado la "nueva" evolución, una situación impensable unos pocos años antes[13]. Aunque todavía se mantienen posturas que oponen auto-organización y selección natural (como las de Brian Goodwin, Susan Oyama o Stanley Salthe), hoy en día prevalece la convicción de que ambos conceptos deben integrarse, lo cual se materializa en modelos que casi siempre recurren a redes booleanas o algoritmos genéticos. Hasta los más refractarios al evolucionismo clásico se han visto obligados a desagraviar a Darwin, pues por más necesitado de ajustes y suplementos que se encuentre su doctrina, ya no puede discutirse que él ha sentado las bases para una comprensión más acabada de la complejidad y el cambio. Observemos que, a todo esto, en la tabla terminan entremezclándose las formas teóricas mayores y las algorítmicas, a despecho que posean naturalezas institucionales y estructuras discursivas diferentes.

¿Qué decir de las grandes narrativas teóricas? Alguna vez habrá que tratar la sucesión de los grandes modelos sistémicos (cibernética, teoría general, teoría de catástrofes, estructuras disipativas, segunda cibernética, cibernética de segundo orden, autopoiesis) en función de su historia y en un marco comparativo. Esto es algo que, fuera del circuito autopoiético, no se ha intentado nunca. Si se hiciera, se podría investigar cuáles son (más allá de sus aportes conceptuales) sus gestos recurrentes, sus diferencias estilísticas, sus estrategias expansivas comunes, sus tácticas de menoscabo de las corrientes rivales, sus aspavientos distintivos de excelencia. Sería posible así apreciar con mayor riqueza interpretativa qué es lo que cada marco tiene de original, o hasta qué punto cada uno encarna un patrón histórico, un automatismo repetitivo, un ciclo inevitable en torno a un atractor periódico en el proceso complejo de producción de ciencia.

Aquí he simplificado la historia y no analicé muchas otras variantes teóricas de la complejidad: el pensamiento de sistemas y el diseño de sistemas de Béla Banathy (1996), la tektología de Alexander Bogdanov (1980), la ecodinámica de Kenneth Boulding (1978), la sinergética o geometría del pensamiento de Buckminster Fuller y E. J. Applewhite (1975), la metodología operacional de Silvio Ceccato (Somenzi 1987), la dinámica organizacional de Vladimir Dimitrov (2000), la dinámica de sistemas de Jay Forrester (Aracil 1983), la sintropía de Luigi Fantappiè, el paradigma hologramático de Dennis Gabor (Pinson, Demailly y Favre 1985), los sistemas estigmérgicos de Pierre-Paul Grassé (1959), la dinámica espiral de Clare Graves, Don Beck y Chris Cowan, la sinergética de Hermann Haken (1986), la teoría de la singularidad de Hassler Whitney, la homeokinésica de Arthur Iberall (1972), la

[13] La *evolutionary psychology* no ha de ser confundida con la psicología evolutiva de Jean Piaget, que tiene prioridad sobre el uso de un nombre de la misma estirpe pero ha sido casi por completo desconocida en los Estados Unidos. La nueva psicología (que es más bien una antropología psicológica con base en la biología) se considera a veces una nueva versión de la sociobiología de Edward Wilson y Richard Dawkins.

teoría del universo auto-organizante de Eric Jantsch (1980), la teleónica de Gyorgy Jaros, la filosofía de sistemas de Ervin Laszlo (1972, 1997), la teoría de Gaia de James Lovelock (1985), la Teoría General de los Esquemas y la Teoría Especial de Sistemas Reflexiva Autopoiética Disipativa [sic] de Kent Palmer, la teoría holonómica de Karl Pribram (1997), la BioTeoría y la teoría de la complejidad de Robert Rosen (1991), la ecopsicología de Theodore Roszak, la teoría de la resonancia mórfica de Rupert Sheldrake, la epistemo-praxiología de Robert Vallée, el positivismo neurológico de Larry Vandervert (1995), la bioesférica de Vladimir Ivanovich Vernadsky (1997), el análisis pansistémico de Wu Xuemou.

Algunas de ellas hubieran merecido revisarse; otras, las que contrajeron alianza simbiótica con la consultoría organizacional o con el posmodernismo, han tenido más prensa de la que se justifica; otras más merecen el olvido en que se encuentran. Como sea, ¿por qué han habido tantas tentativas en vez de una sola? Dado que todas proponen una visión panóptica y son más parecidas que diferentes ¿por qué motivo siempre empiezan de cero, sin capitalizar otras experiencias o evitando citar ciertos nombres? ¿Por qué a tantas de ellas se les adhieren jergas idiosincráticas, interpretaciones místicas, exégetas fundamentalistas, celebradores de genios? Cuando pase el tiempo ¿se verán también confinadas las teorías de la complejidad y el caos en la misma galería de curiosidades históricas que parece ser el destino fatal de muchas de esas sistémicas?

La multiplicidad es también reveladora en otros sentidos. Cuando se observan los modelos en conjunto, algunas regularidades se tornan evidentes aún antes de emprender una exploración a fondo. Primero que nada, se comprueba que las viejas corrientes contenían ya los principales temas por los que las nuevas han sido exaltadas. La versión discursiva de las ciencias de la complejidad deplora, por ejemplo, los viejos conceptos de isomorfismo, retroalimentación, máquina cibernética, organización y homeostasis y celebra las nuevas categorías de transdisciplinariedad, recursión, máquina viva, auto-organización y autopoiesis (Morin 1999: 183-218). Pero está claro que la segunda serie depende, miembro a miembro, del fundamento que le brinda la primera. Si se leen los textos originales, además, se comprobará que en la trayectoria de la primera Gran Teoría a la última no ha habido una ruptura sino apenas una variación connotativa, con escasas modificaciones semánticas de fondo: las viejas y las nuevas categorías son muy próximas y ya se ha visto que en los antiguos marcos se las había definido mejor, sin aditamentos axiológicos y sin insinuaciones de corrección política o exaltaciones del sujeto *pour la galerie*. Ahora que los ánimos se han calmado, se están volviendo a evaluar los aportes de la TGS y la primera cibernética; la comparación que inevitablemente surge dista de ser halagüeña para muchas de las teorías que vinieron después (Rosen 2000: 145-155; Bausch 2002; Johnson 2003: 39-54; Strogatz 2003: 40-69, 296).

En lo que concierne a la visión discursiva (Morin, Jantsch, Capra), tampoco se brinda desde ella una transdisciplinariedad verdadera, sino una agregación dictada desde un campo inespecífico, que no aporta nada de lo que se requiere para una implementación operacional en una disciplina concreta (Dobuzinskis 2004). Los métodos discursivos dicen qué es lo que hay que hacer (religar, integrar, superar, complementar) pero no especifican cómo es que eso podría hacerse. La axiología discursiva adultera también la historia que pretende contar. Las transformaciones decisivas en el paso de las primeras cibernéticas a las últimas no se han dado en el plano paradigmático, sino en el punto de vista desde el cual ella los interpreta, en la indulgencia que les quiere conceder y en las complicidades que ha consumado en

la constitución de su propia clausura operacional. Por poco que se consulten las fuentes se comprobará también que, con todas las limitaciones que se quiera, la ontología de los primeros estudiosos de la complejidad raya más alto que la metafísica rudimentaria del constructivismo, y que ninguna formulación temprana ha pretendido justificarse sobre la base del descrédito de otras formas de pensar antes de construir su propio fundamento experimental o matemático. Lejos de precipitarse en un callejón sin salida por sustentar una concepción informacional limitante, o por promover una visión del hombre como máquina, las ciencias de la complejidad se hicieron posibles cuando Shannon se atrevió a separar información de significado y cuando Von Neumann sentó las bases del procesamiento mecánico inspirándose en los mecanismos primarios de procesamiento, que no son otros que los del pensamiento y los de la vida (cf. Aspray 1993: 206, 208). Los hechos y los valores no han sido como se cuenta en las historias morales que han escrito Morin, Dupuy, Capra, Varela e Ibáñez, sino por completo al revés.

Otro factor constante es la propensión de un número desproporcionado de las estrategias de la lista ampliada (de la mano de la autopoiesis y el constructivismo) a confluir con la mercadotecnia de la auto-ayuda, la *new age*, las congregaciones inspiracionales para ejecutivos estresados, el vitalismo holístico, el orientalismo californiano, las formas institucionales de búsqueda de la iluminación, la ecosofía, las tradiciones gnósticas y herméticas, la exploración de las fronteras del potencial humano, los planes de re-encantamiento del mundo[14]. Las teorías periféricas, en efecto, han generado una narrativa que habla de una metamorfosis radical de los paradigmas científicos, de la futilidad de la lógica, de la pérdida de las certidumbres, optando por un camino sapiencial que lleva más allá de la razón. Aparte de su tono inflamado y quimérico, la diferencia filosófica entre estos argumentos y los de la investigación social de segundo orden, la ecología profunda o la dinámica organizacional no puede considerarse significativa. Si remontamos la corriente de esa línea de argumentación encontraremos las ideas prigoginianas de la nueva alianza, la ecología batesoniana de la mente o la autopoiesis, o todo eso recombinado. Podría argumentarse que se trata de abusos interpretativos que no afectan el buen nombre y honor de las formulaciones originales; pero los inspiradores científicos de esa inflexión (Lovelock, Varela, Maturana, Jantsch, von Foerster, Prigogine, Bohm), cuando no la han respaldado activamente, han resuelto que es mejor negocio guardar silencio y dejar hacer. Algunos han ido más lejos: Ervin Laszlo, por ejemplo, cree a pies juntillas en la percepción ultrasensorial y la trasmigración; Capra y von Foerster han dado crédito a los cuentos de Castaneda, a los que interpretan como una muestra representativa del saber antropológico y un reflejo fiel de la alteridad cultural (Pakman 1991: 69, 79, 90; Laszlo 1997: 148-168). Quien promueva los formalismos de la complejidad deberá distraer mucho esfuerzo para persuadir a sus colegas científicos de que su marco no rinde tributo a semejante fantasmagoría.

---

[14] La lista es inmensa. A vuelo de pájaro encontramos en ella ideas como el universo autoorganizado, Maya-Gaia, el trance creativo, el cerebro global, la búsqueda rhizomática, el biocampo telepático, el campo psi (ψ), la resonancia mórfica, la sincronicidad, el universo reflexivo, el universo espiritual, el *self* cuántico, la cognición cuántica, la conciencia cuántica, el despertar cuántico, la Obra del Cielo (*SkyWork*), el holomundo, la holonómica, la ciencia holonómica alquímica, la hiper-esfera, la conciencia expandida, el Ultra-Ser, el camino más allá del vacío, la trascendencia neotántrica, la coincidencia significativa, el cuerpo etéreo, el registro akáshico, los colores del pensamiento, el algoritmo de la reencarnación y el campo morfogenético.

Una tercera regularidad llamativa radica en que todas las corrientes mayores que hemos revisado poseen un libro canónico para el público en general, escrito por su caudillo en persona. En la cibernética es, naturalmente, *Cibernética* de Norbert Wiener (1985); en la teoría general de los sistemas es el texto epónimo de Bertalanffy (1976); en la teoría de catástrofes, *Estabilidad estructural y morfogénesis* (Thom 1997); en la teoría de sistemas alejados del equilibrio *La nueva alianza* de Prigogine y Stengers (1983); en la autopoiesis *The tree of knowledge* (Maturana y Varela 1987). Todos ellos se presentan como preámbulos a lo que caracterizan como un nuevo giro en el pensamiento científico, o como toda una nueva ciencia, superior y envolvente.

Todos los textos, por otra parte, incluyen capítulos en los que se examina la posibilidad de propagar los nuevos evangelios hacia las ciencias humanas. Ningún autor se abstiene de hacerlo, aunque en otros contextos (habitualmente en reportajes) admita la improbabilidad de esa expansión. Esos capítulos siempre ocupan las últimas páginas, cuando todo lo esencial ya se ha tratado; acostumbran ser superficiales y sintéticos, porque el autor no domina las claves de las humanidades; siempre suenan un poco condescendientes, como si estuvieran haciendo algún favor a una forma de saber más carenciada; e invariablemente han sido considerados desde las ciencias blandas por igual decepcionantes, aunque en ellas se contemplen con simpatía los proyectos en sí.

En reciprocidad, el tratamiento que nuestra disciplina ha dado a los marcos sistémicos primero y a los algoritmos de la complejidad después ha sido igual de episódico y harto minoritario. La mayoría de los antropólogos ni siquiera sabe que existen, o los mira como los matemáticos conservadores vislumbraban las curvas monstruosas, las paradojas y las anomalías. Para el grueso de la profesión los fractales son curiosidades lúdicas, las catástrofes extravagancias conceptuales, el caos un incognoscible, los sistemas una abstracción obsoleta: rarezas poco importantes, elucubraciones de las que un pensador sensible no puede extraer ninguna ganancia. Además, eso de los modelos sonaba excitante cuando Lévi-Strauss proponía que se hicieran, pero no ahora que se puede saber de qué se tratan, tocar con la mano o descargar de Internet. ¿Acaso no basta con hablar de la realidad para descifrarla? ¿No acarrean los modelos demasiada técnica para tan poca teoría?

En consecuencia, la complejidad se sigue tratando como sobreabundancia mecánica, incertidumbre estadística u opulencia hermenéutica, sin que se piense que para abordarla hace falta una epistemología especial o una herramienta particular. Alguna vez hubo un período de incorporación de ideas cibernéticas en la ecosistémica, ahora está pasando algo parecido con el neodarwinismo en ecología y psicología evolucionaria, pero eso es todo. Ahora las herramientas involucran modelado algorítmico, y ninguno de los comunicadores interdisciplinarios de tiempo completo (desde Morin a Varela) ha tenido suficiente comercio con ellas para explicar bien qué significan, reconocer sus alcances y atolladeros, o indicar la forma en que se podrían instrumentar en una ciencia empírica. No hay genuinos pedagogos, por otra parte; los que podrían serlo sólo se afanan por promocionar su propia imagen y por lanzar al mercado más variantes teóricas que las que hacen falta. Entre los antropólogos, los apasionados de las nuevas algorítmicas son demasiado pocos y demasiado jóvenes; ninguno es un formador de opinión reconocido, y la creencia general es que si sigue así no lo será nunca. Cuando alguien habla de antropología de la complejidad seguramente se trata de un filósofo, y como su antropología no significa lo mismo que la nuestra, a nadie le importa.

De allí la reticencia. Con la salvedad de un simposio hace un cuarto de siglo al que no concurrió ninguna celebridad antropológica, nunca se han revisado las teorías de sistemas desde la disciplina con la paciencia que sería menester. Tampoco abundan los ensayos antropológicos que examinen el espacio transdisciplinario en profundidad y articulen una metodología compleja para la disciplina. Los sociólogos y los psicólogos los han desarrollado de tarde en tarde (Wiener y Schadé 1969; Eve y otros 1997; Kiel y Elliott 1997; Mathews y otros 1999; Byrne 2003); los economistas, politólogos, teóricos de la organización y geógrafos, a cada momento (Allen 1992; Epstein y Axtell 1996; Axelrod 1997; Torrens 2000). Nosotros no. Cuando alguien lo intenta alguna vez, como tímidamente se atrevió a hacerlo Richard Adams (2001), ningún otro especialista del mismo campo vuelve a citarlo jamás, ni siquiera para lucirse un poco haciéndolo pedazos. Los antropólogos festejamos de la boca para afuera el pensamiento independiente, la imaginación seminal y la transgresión de las fronteras, pero más allá de unas pocas excepciones (el *habitus* de Pierre Bourdieu, la estructura de sentimiento de Raymond Williams, la hermenéutica, la deconstrucción), en la práctica se minimiza la importación de conceptos e inspiraciones de otras disciplinas, como si la segregación y la idiosincracia fueran las condiciones de existencia de la nuestra. Que las otras disciplinas sean ahora una transdisciplina no ha sido tampoco un factor diferencial.

El resultado de este doble vínculo está a la vista. De todas las ciencias sociales, la antropología es la que más atraso y desinterés manifiesta por las ciencias de la complejidad. Fuera de los enclaves tribales del LANL o el SFI, no se ha intentado, que yo sepa, ningún diálogo entre matemáticos y antropólogos a fin de desembrollar el significado y la operacionalidad de los conceptos complejos o reclamar una reflexión sobre nuestra ciencia un poco más sólida que la de aquellos capítulos conclusivos concedidos por los popes y escritos a las apuradas. Nunca antes que este libro se escribiera se examinaron a fondo los instrumentos disponibles, los trabajos hechos y los recursos para hacer. Alguno argumentará que esas teorías no nos convienen porque la producción antropológica erigida sobre ellas es hasta ahora muy exigua, porque los cuatro o cinco intentos sistémicos anteriores fueron insustanciales o porque los antropólogos que practican el modelado son propensos a tratarlo como un fin en sí mismo. Pero ¿se ha hecho todo lo que puede hacerse? ¿Es razonable que hasta hoy un solo ensayo antropológico, el de Ron Eglash (1999), dedique unas pocas páginas al concepto de recursividad, que la epidemiología evolutiva de Sperber (1996) desconozca el algoritmo genético, y que nuestros expertos en cuestiones complejas piensen que han cumplido su deber una vez que han citado a Edgar Morin o maquillado un poco la terminología?

Sea como fuere, las diversas oleadas de la teoría de sistemas ya son cosa del pasado reciente, o en el mejor escenario, movimientos de porvenir incierto. Pequeños sectores de nuestra disciplina se beneficiaron traficando conceptos encontrados en sus territorios, pero es difícil determinar lo que la antropología en su conjunto ha ganado o perdido en ese trance. Es indudable que esas teorías enseñaron a unos pocos estudiosos a desconfiar de los mecanismos simples, las causaciones lineales, los esquemas temporalmente reversibles, los determinismos ingenuos, las reducciones a principios elementales y el sentido común analítico. Pero la vieja sistémica no se adoptó con las provisiones metodológicas que correspondían y la nueva sistémica discursiva amenaza con cristalizar como un programa que ya tiene posición ontológica tomada a propósito del sujeto y de la realidad; por más que sus teorías sean totalizadoras y locuaces, lo suyo se consuma en la práctica como un ejercicio de inventario de lo que no existe, lo que no se sabe o lo que no puede hacerse. La antropología, mientras tanto, no muestra gran interés por las narrativas complejas, ni para bien ni para mal. En el

interior de la disciplina, la única novedad teórica de los últimos años es una propuesta de antropología neo-boasiana, en las antípodas de lo que podría ser una indagación transdisciplinaria (Bashkow y otros 2004; Bunzl 2004; Orta 2004).

Muy probablemente esa indiferencia se deba a que los relatos envolventes propios de las grandes teorías son cosa del pasado; lo que piden ahora quienes todavía quieren hacer algo son herramientas de grano fino, antes que visiones del mundo, líderes admirables o espacios de militancia. Aquí es donde entran los algoritmos. Ellos brindan precisamente esas herramientas, y lo hacen en cantidad. Ellas permiten atacar al menos un pequeño repertorio de problemas desde un ángulo diferente, sin que importe mucho que siga faltando una teoría de la complejidad cabal o incluso una definición consensuada de lo complejo. Aunque líderes de la ideación algorítmica (Wolfram, Holland, Kauffman, Strogatz) también caen a veces en la tentación de forjar grandes síntesis literarias, el campo parece (auto)organizarse mejor cuanto más atomizado se encuentra.

Pero al menos un mensaje importante ha pasado en herencia de las grandes teorías a los juegos algorítmicos: los principios que rigen la complejidad son los mismos en todas partes sin importar la sustancia. Esta puede ser inanimada, viviente o cultural; los antiguos límites han perdido significación. Escribe Per Bak:

> El paso de describir la materia inerte a describir la vida biológica parece enorme, pero tal vez no lo sea. Tal vez los mismos principios que gobiernan la organización de la complejidad en geofísica gobiernen la evolución de la vida en la tierra. Entonces la naturaleza no habría tenido que inventar súbitamente un nuevo principio organizacional para permitir que surja la materia viva. Bien podría haber sido que un observador que estuviera por allí cuando se originó la vida no viera nada digno de atención: sólo una transición continua … de simples reacciones químicas a interacciones más y más complicadas sin un punto marcado de transición indicando el momento exacto en que la vida comenzó (Bak 1996: 113).

Habría que pensar entonces que si ese límite se ha diluido, podría no ser demasiado juicioso pretender separar la cultura de todos los demás dominios complejos y reclamar para ella una epistemología especial. El día que se imponga por completo la postura que proclama que "el hombre [sic], sencillamente, no pertenece a la naturaleza" (Böhme 1997: 74) deberemos decir adiós a transdisciplinariedad y fraguar una ciencia cerrada, sorda a todo lo que se genere en otros órdenes de teoría y práctica.

Algo así estuvo sucediendo en los últimos treinta años, con resultados que están a la vista. El desarrollo teórico de la antropología reciente, dominado por el programa del conocimiento local y signado por relaciones interdisciplinarias de un solo sentido de circulación, no ha justificado siquiera las expectativas más modestas. Por más que quiera estudiarse lo que los sujetos y las culturas tienen de particular, lo cual es tanto legítimo como necesario, parece razonable ampliar el horizonte y dejar entrar las ideas que sirvan. En los centros neurálgicos de la ciencia de la complejidad y el caos, como el LANL y el SFI, la transdisciplinariedad es la norma absoluta; son lugares donde "un biólogo puede venir a escuchar a un economista que explica cómo funciona el motor de un jet" (Bak 1996: 144). "Me encanta –escribe Axelrod– que un cientista político sea capaz de adaptar una herramienta de computación científica y contribuir de este modo a la biología evolucionaria" (Axelrod 1997: 12). Esto ya no es reduccionismo, porque nadie está forzado a extrapolar una semántica peculiar, ni hay una ciencia madre que defina el molde a imponer a todas las demás, ni una jerarquía en la que las ciencias de arriba integran a las de abajo. Una cosa es reducir la so-

ciedad a átomos, circuitos o máquinas, y otra muy distinta advertir que la organización, la complejidad, la emergencia y el cambio en sociedades, organismos o lo que fuere involucran las mismas clases abstractas de problemas, estructuras y procesos. Dice David Byrne, profesor de Política Social de la Universidad de Durham:

> Las ciencias sociales tienen mucho que aprender de estos campos. Pero (y se trata de un gran pero) una vez que las ciencias sociales salgan andando, los otros campos de estudio tendrán mucho que aprender de ellas. Ciertamente, el proyecto ya está bien avanzado en relación con el desarrollo de ideas metateóricas fundamentales. … No hay aquí jerarquías, no hay ningún campo y/o perspectiva disciplinaria más o menos fundamental. Estamos en esto juntos en iguales términos (Byrne 1998: 17).

Se trata simplemente de la lógica de lo complejo operando en todos lados de la misma manera. Las gramáticas del lenguaje humano proporcionan las reglas del crecimiento de las plantas, un mismo autómata puede interpretarse como modelo de propagación de enfermedades, de incendios, de innovaciones, de imperios o de rumores, y a los sucesos de la historia de la cultura o del arte se aplican iguales ecuaciones que a la evolución de las especies, al aprendizaje o a la optimización de programas de computadora. Técnicamente, las clases de universalidad, herederas de la idea sistémica de isomorfismo, constituyen el pasaje que permite abordar transdisciplinariamente esos problemas. Físicos como Gábor Fáth y Miklos Sarvary han comenzado a proponer hipótesis de evolución cultural a la luz de la teoría de renormalización de grupos (Fáth y Sarvary 2005a; 2005b).

La transdisciplina compleja promueve el intercambio en todos los sentidos. Uno de los libros de cabecera de Chris Langton es *Cerdos para los antepasados* de Roy Rappaport, y los especialistas de su círculo tienen a la antropología en altísima estima y a la cultura como una dimensión a tener siempre en cuenta. La nueva ciencia de las redes complejas recupera ideas del antropólogo Siegfried Nadel sobre la importancia de los grupos en el orden social, mientras los modelos computacionales multiagentes se sirven de metáforas de las ciencias sociales para arquitecturar sistemas que resuelven problemas imposibles de tratar secuencialmente (Huberman 1988; Helmreich 2001: 615; Watts 2004: 143-155, 320). Murray Gell-Mann menciona cada tanto a *Naven* de Bateson como arquetipo de una visión reflexiva que percibe causaciones y pautas complejas que demandan para su tratamiento formas teóricas que todavía no existen. En *Steps to an Ecology of Emergence*, Malloy, Bostic y Grinder (2004) usan la idea batesoniana de "diferencia" para esclarecer el concepto de distinciones jerárquicas en redes booleanas. Buena parte del libro *Complexity* del periodista científico Roger Lewin tiene que ver con dilemas planteados en primera instancia en el estudio de la dinámica cultural (Lewin 1999: 2-9, 17-21, 47, 70-71, 151, 193-194). Los algoritmos culturales de Robert Reynolds, con sus metáforas de civilizaciones, líderes, individuos y migraciones, se utilizan regularmente en computación, aplicados a problemas complejos de optimización y búsqueda; se ha reportado que son de excelente performance, atribuyéndose esa virtud a que la adaptación cultural es más rápida que su contrapartida natural (Ray y Liew 2003; Haupt y Haupt 2004: 199). El punto es que la transdisciplinariedad no ha cuajado en las ciencias de la complejidad como una yuxtaposición sumativa de (o un trueque fortuito entre) disciplinas, sino como un territorio emergente sin límites académicos, en el que cada quien participa conforme a sus intereses, que pueden ser disciplinarios o ir más allá. Lo expresa Murray Gell-Mann:

> Están surgiendo materias nuevas, altamente interdisciplinarias en términos tradicionales, que muchas veces representan las fronteras de la investigación. Estas materias interdiscipli-

> narias no vinculan en su totalidad a una disciplina tradicional con la otra, sino que se unen subáreas específicas para conformar una nueva materia. El modelo es variado, y sujeto a cambios continuos (citado por Pagels 1991: 37).

Si algún día ha de encontrarse la pauta que conecta que buscaba afanosamente Bateson, sin duda será por este lado. Cuando se encuentre, se percibirá de inmediato que es una pauta en construcción, con muchos aspectos debatibles por resolver y con regularidades universales que se saben ciertas (como la ley de potencia, o la constante de Feigenbaum), pero que dudosamente lleguen a explicarse alguna vez. De allí la inestabilidad intrínseca del paradigma, pero también su dinamismo, sus grados de libertad. Si el modelo de la pila de arena no sirve para saber qué pasó con los Anasazi, quizá deba formularse de nuevo o dejar paso a una metáfora mejor. Si todo esto configura una ciencia distinta, no lo sé; pero que es una práctica creativa, apasionante y digna de interés, eso es seguro.

En el escenario de mínima, las nuevas ciencias proporcionarán herramientas modeladoras puntuales a la investigación empírica, antes que marcos teóricos sustantivos. Por eso mismo, algunos elementos de juicio, hipótesis de trabajo y conclusiones relativas a las ciencias de la complejidad y el caos serán de relevancia cualquiera sea la teoría a la que se adscriba. Estos son los que creo fundamentales:

- La complejidad es emergente aún en situaciones de muy pocas variables (una o más) en las que haya una dimensión de tiempo e interacción. No se requiere una inmensidad de factores para que se manifieste. En los autómatas celulares y en otros dispositivos de modelado, puede comprobarse que se genera a partir de reglas y situaciones en principio muy simples, y que una complejización adicional de las reglas no suscita ni mayor complejidad, ni formas diferentes de lo complejo (Wolfram 2002; Camazine y otros 2003).
- El azar no es un factor esencial del paradigma complejo. La teoría del caos es, de un extremo al otro, determinista (Schuster 1984; Ruelle 1990; Leiber 1998). Ni se necesita azar para que sobrevenga caos, ni la estructura del caos se torna más compleja en escenarios de incertidumbre. Jean-Pierre Eckman (1981) y Thomas Carroll (2005) probaron también que hay sistemas caóticos que son peculiarmente insensibles al ruido; en condiciones de interferencia sus atractores cambian salvajemente de aspecto pero no pierden su naturaleza fractal. Aún si se escoge otra ecuación los patrones son invariantes; "las figuras se distorsionarán un poco, como si estuviesen dibujadas en un trozo de goma y se estiraran, pero sus rasgos esenciales permanecerán inmutables" (Kadanoff 1999: 486). Donde prevalezcan de punta a punta condiciones de azar, o intervengan factores externos fuera de control, no cabe esperar auxilio de las teorías de la complejidad; habrá que echar mano de modelos estadísticos, que para eso están.
- Por otra parte, el azar es débil. Con el algoritmo genético se converge hacia soluciones óptimas aún cuando la población inicial sea aleatoria; el azar no es en él un impedimento sino un recurso estratégico deliberado que se usa para establecer una condición inicial de diversidad. Todos los algoritmos conocidos en sistemas adaptativos complejos, desde la regla de voto de Gerard Vichniac a la máquina de mescolanza de Gerhard y Schuster, desde el modelo de Greenburg-Hastings hasta el espacio cíclico de David Griffeath y A. K. Dewdney, verifican que basta imponer una regla mínima al azar más profundo para que se generen patrones de orden. El orden es gratis, ha dicho Kauffman: dado un circuito eléctrico de diez mil bombillas, conectadas al azar con otras dos y con reglas de encendido distribuidas al azar (p. ej. que si las dos bombillas conectadas están

encendidas o apagadas, la bombilla se enciende), no surge nada que se parezca a un patrón de azar: se obtiene un patrón ordenado. La intuición de que sólo se obtiene orden si se diseña expresamente un sistema preciso es errónea (Brockman 2000: 317). De hecho, las teorías complejas comenzaron a hacerse posibles cuando se descubrió que había un mundo más allá del azar; las teorías centradas en este último, de hecho, tuvieron su período de gloria hacia la década de 1970 y hace mucho han dicho todo lo que tenían que decir. Es así que, en teoría de redes, los grafos aleatorios de Erdös y Rényi (que presuponen distribuciones normales o de Poisson), se vieron sucedidos por las tríadas dinámicas de Anatol Rapoport, por los pequeños mundos de Stanley Milgram, Duncan Watts y Steven Strogatz y por las redes independientes de escala de László Barabási, cuyas estructuras y propiedades reenvían al caos y a los fractales. Para comprender la dinámica compleja el horizonte a superar no es el determinismo sino la tentación del azar (Barabási 2003: 54, 56, 72, 227; Strogatz 2003: 237-238; Watts 2004).

- Hay más patrones de orden a partir del caos de lo que se sospechaba antes de explorar su estructura, aún cuando ahora se sepa que la predicción a mediano y largo plazo en escenarios caóticos es y será por siempre imposible, debido a su extrema sensitividad a las condiciones iniciales. Acaba de surgir, además, una nueva forma de acción práctica que ha generado un intenso campo de estudios y aplicaciones en torno del control del caos: aunque parezca una paradoja, la propiedad misma de la impredictibilidad caótica se puede usar para controlarlo, imprimiendo pequeñas oscilaciones a algún parámetro accesible en sistemas analíticamente intratables. El costo energético, material o informacional requerido para controlar un sistema caótico es menor que el que se requiere para un cambio de conducta en un sistema en equilibrio o de comportamiento cíclico. En poco más de una década, este campo, iniciado por los inventores del "método de control OGY", Edward Ott, Celso Grebogi y James Yorke (1990), generó un reguero de investigaciones en física, biología, química, electrónica, manufactura y medicina (Boccaletti y otros 2000; Chen y Yu 2003). Las ciencias políticas han comenzado a explorar posibles usos e implicancias de esta línea de investigación (Elliott y Kiel 1997: 72-74). Al lado del OGY se encuentran hoy otros algoritmos de control, como *continuous delayed feedback* (CDF), *occasional proportional feedback* (OPF), *time-delayed feedback*, etcétera. Se ha leído bien: *feedback*; negativo, por añadidura. Al cabo de un camino cuyo recorrido demandó sesenta años, el nuevo control del caos ha insuflado una segunda vida a la primera cibernética.
- La no linealidad y la emergencia hacen que los modelos mecánicos no sean los mejores en situaciones de caos; pero las estrategias basadas en la intuición pura (por ejemplo, la hermenéutica) resultan aún más impropias en esos escenarios que el reduccionismo mecanicista. Es por ello que las aproximaciones discursivas a la complejidad, dominadas malgrado suyo por el sentido común, no pueden sacar jugo de las técnicas complejas reales y de las razones que las fundamentan y quedan atrapadas en una metaforización imprecisa; esta "lectura cualitativa" que las ciencias blandas hacen de las ciencias duras ha sido tan mediocre y maquinal que su recurrencia ha llegado a ser objeto de preocupación y estudio (Young 1991; Johnson y Burton 1994: 320; Mathews y otros 1999: 442; Thrift 1999; DeLanda 2002; Dobuzinskis 2004; Mackenzie 2004). Lejos de mí subestimar las metáforas del campo discursivo, pero ¿por qué tienen que ser siempre las mismas, y por qué son tan unánimes ideológicamente? Hace unos años, la intuición (bajo la forma de la abducción, la inferencia clínica, el pensamiento débil o el pensamiento indi-

ciario) parecía abrir puertas negadas al cientificismo vulgar; ahora que se revelaron universos complejos a los que ella no llega fácilmente, se la ve más limitante que habilitadora, al menos en ese terreno. Si la hermenéutica no encuentra la forma de sacar jugo a un enfoque novedoso, a una "ciencia alegre" (Bak), a unos juegos del conocimiento "que no hay que tomarse demasiado en serio" (Atlan) y a un régimen de trabajo transdisciplinario, tal vez sea ella la que deba revisar sus supuestos, los que por otra parte llevan ya muchos años sin experimentar un desarrollo que hasta sus partidarios más desesperanzados están exigiendo (Vattimo 1997).

- Hoy por hoy las ciencias del caos y la complejidad no hacen buen juego con las preocupaciones hermenéuticas; más aún, el conexionismo radical excluye la representación simbólica y con ello todo lo que tenga que ver con signos, significado y semiosis (Varela 1990). También el posmodernismo, entre las caducidades que anuncia, proclama la crisis de la representación. La semántica compleja recién está comenzando a esbozarse, y todavía es incierta y embrionaria (Kauffman 2000: 109-118; Rosen 2000: 156-170; Kubik 2003). Para que se disponga de una hermenéutica compleja aceptablemente sistemática habrá que esperar largo rato y a juzgar por lo que se lleva hecho no me atrevo garantizar que valga la pena.
- Lo que se sabe hoy de emergentes indica que no se puede invocar en un mismo marco al individualismo metodológico y a la complejidad. Cualquier totalidad es, ahora sí rotundamente, muy distinta a la suma de sus partes. Por eso mismo es conveniente diferenciar y marcar con claridad las posturas que, bajo la bandera de la dinámica no lineal, pretenden resucitar la ontología reduccionista. Algunos científicos sociales ya han percibido estas tendencias conservadoras en el seno mismo de las nuevas teorías, en particular entre las que promueven técnicas de modelado basado en agentes (Gilbert 1995: 146; O'Sullivan y Haklay 2000; McGlade 2003: 112). En este contexto, el individualismo carece de razón: en último análisis, la auto-organización y el efecto de emergencia "de la parte al todo" no surgen de la iniciativa arbitraria de los agentes individuales, sino de sus relaciones recíprocas, de lo que en AG se llama epistasis y en ABM se ha caracterizado como "la sorprendente suficiencia de las reglas simples" (Epstein y Axtell 1996: 51). Como se viene probando desde los modelos de Sakoda y Schelling, ningún agente puede tampoco alterar a su antojo la totalidad en que está inmerso, porque las consecuencias agregadas de la interacción no son lineales y escapan al alcance del cálculo subjetivo aún en condiciones de equilibrio y periodicidad.
- Mal que nos pese, la complejidad se resuelve en algoritmos, antes que en teorías. Debido a las razones ya expuestas, el algoritmo complejo no admite una inferencia simple que prediga la conducta de lo que él modela. La única forma de averiguar qué puede suceder en escenarios dinámicos es activando el modelo y observando lo que ocurre. Pero ya no se trata de modelos de simulación simbólicos que implementan el algoritmo y lo ejecutan a razón de un conjunto de variables por vez; hay ahora otros modelos más ricos que permiten explorar espacios de fases, pues la nueva ciencia busca más comprender el comportamiento cualitativo global y recurrente de un sistema que encontrar la solución cuantitativa local para un solo caso. Es la forma de los atractores y la topología del paisaje abstracto lo que cuenta, y no la predicción exacta de una trayectoria individual (Tufillaro y otros 1990: 5). Esta perspectiva es acaso la de mayor potencial. Las teorías del caos y la complejidad presienten su propio futuro ya sea como una algorítmi-

ca plasmada en imágenes (Kauffman 1995: 21-22; Wolfram 2002: 737-750), como una práctica modélica "generativa" o "de abajo hacia arriba" en la cual la conducta se juzga a partir del cambio configuracional del sistema (Axelrod 1997: 3-9), como un paradigma iconológico (Harvey y Reed 1997: 318-319) o como un paradigma visual de modelado (Eckman y otros 1987; Batty, Steadman y Xie 2004): una ciencia de patrones, una práctica fractal.

- En esa circunstancia, los algoritmos de la complejidad servirán para abordar puntos específicos de la investigación antes que para proporcionar el marco de referencia, el cual podrá articularse en conformidad con la teoría que se quiera. Una buena caracterización del alcance de los métodos caóticos es la que proporciona Theodor Leiber (1998: 23): "[U]na especie de caja de herramientas de métodos topológicos, perturbacionales y numéricos que son ciertamente útiles para un análisis y una comprensión más detallados de los sistemas dinámicos cuyas trayectorias deterministas exhiben la propiedad de sensitividad exponencial a las condiciones iniciales". En esta perspectiva sería afortunado que, una vez que el modelado complejo se consolide, deje de ocupar los primeros planos y trasmute en un conocimiento instrumental más, al lado de las técnicas mecánicas y estadísticas que resulten convenientes.
- De ningún modo es cierto que "la dinámica compleja no obedezca a las leyes del razonamiento lógico", como pretende la facción irracionalista (Dimitrov 2000) o incluso Morin (1984: 321-337). Por el contrario, es la razón en todo su esplendor lo que permite comprender y experimentar la lógica peculiar de la no-linealidad. De hecho, la literatura avanzada de complejidad y caos constituye una densa fábrica de teoremas y demostraciones de contenido innovador, pero de régimen absolutamente clásico (Tufillaro y otros 1990; Arrowsmith y Place 1990; Wiggins 1996; Addison 1997; Bar-Yam 1997; Williams 1997; Hilborn 2000; Boccara 2004). En los modelos caóticos, la impredictibilidad surge en lugares lógicamente predecibles a partir de ciertos precisos rangos de variable o combinación de factores, como resulta patente en el mapa logístico o en los fenómenos de criticalidad. En la periferia de las ciencias de la complejidad hay por cierto algunas afirmaciones anti-lógicas en la tradición que va desde Gregory Bateson (1981) a Robert Rosen (1991). El primero decía que la lógica es un mal modelo de causalidad; el segundo promovía una visión en la cual la complejidad se definía a partir de la irreductibilidad al modelado y a la computación. Pero esas alternativas son endebles. En lógica, una expresión como "Si *P* entonces *Q*" no tiene que ver con la causalidad sino con la implicación; al tratar de ella, Bateson equivocaba los tipos lógicos. Mal que le pese a Rosen, por otra parte, los seres vivos (arquetipo de su noción de complejidad) efectivamente se replican a través de un código computable, como lo saben los clonadores de ovejas o los cultivadores de tomates transgénicos.
- Se ha exagerado mucho, además, el carácter paradojal de la complejidad; en un libro de rara excelencia, Philip Ball (2001) proporciona un catálogo impresionante de procesos sorprendentes de auto-organización, tanto biológicos como físicos, que se pueden comprender muy bien en términos de principios físicos y químicos complejos pero siempre estándares. También se ha demostrado recientemente que si un modelo se expresa en términos de álgebra de procesos en vez de funciones, es posible explicar la conducta de un sistema en base a las interacciones de sus componentes: la emergencia misma no es inexplicable (Hatcher y Tofts 2004). Las formas de racionalidad subyacentes a las teo-

rías de la complejidad, en suma, son las mismas que las del resto de la ciencia (Price 1997: 3; Leiber 1998: 47; Bunge 2004). Se las puede suplementar con lógicas temporales, polivalentes, no monotónicas, deónticas, epistémicas, intuicionistas, prohairéticas, paraconsistentes, erotéticas, infinitarias, modales, estacionarias, de segundo orden, subestructurales o difusas. De hecho, las lógicas "desviadas" se han usado más en los paradigmas mecánicos y estadísticos que en los complejos. Más allá de su engañosa apariencia y de las exégesis interesadas, las nuevas ciencias ni se salen de las formas ancestrales ni exigen renunciar a ellas. Como bien dice el sociólogo Raymond Eve (1997: 271-272), "sería posible deslegitimar la ciencia sobre ciertas bases; pero el nuevo estudio de la dinámica no lineal no será la herramienta que tire abajo la casa de la ciencia".

- Sin que la teoría original tenga hoy en día ninguna incidencia en su campo inicial de investigación biológica, y sin haberse constituido en un movimiento influyente en ciencia cognitiva o en modelado computacional, está coagulando con tres décadas de demora una especie de ortodoxia autopoiética en antropología, con énfasis en los sistemas observadores y a poca distancia ideológica del subjetivismo más conservador y del constructivismo más radical. Se trata de una extraña simbiosis entre un ostensible metarrelato legitimante en estilo de Gran Teoría y una actitud de nihilismo posmoderno (Zolo 1990). Desde hace tiempo se viene señalando que la autopoiesis es una doctrina homeostática constitutivamente incapaz de abordar el cambio (Kampis y Csanyi 1985); se cree también que su modelo se encuentra portentosamente desacoplado del mundo físico y que no define ni explica ni siquiera lo viviente (Swenson 1992). En biología molecular se la considera más un relicto del pasado que una promesa futura; tras una etapa híbrida en la que se habló de auto-trascendencia, auto-génesis y auto-katakinesis, se ha visto reemplazada por teorías de la complejidad densamente informacionales, incluyendo la genómica, la post-genómica, la biología estructural, la proteómica, la metabolómica y la ciencia de la señalización (Collier 2002). El propio Varela minimizó las referencias a la autopoiesis en sus últimos años. Pero su triunfo en un sector de la práctica antropológica parece seguro porque en nuestra disciplina sirve al propósito de dar lustre y convalidar un subjetivismo que ha sido dominante el último cuarto de siglo y que lo seguirá siendo mucho más tiempo porque lenguajear en sus términos es mucho más fácil.
- A nadie le importará que el objeto de las ciencias sociales haya sido expresamente excluido por los fundadores de la idea como campo legítimo de aplicación; o que el retrato que los autopoiéticos han pintado de la ciencia cognitiva sea tendencioso; o que los formalismos de la Vida Artificial y de las redes booleanas hayan suministrado una alternativa parecida, más instrumental y menos crispada; o la anomalía que implica que Varela y Maturana postulen una *máquina* para la cual no se ha provisto en treinta años un solo algoritmo, regla de transición, modelo formal o programa que funcione decentemente. Como en el mercado teórico siempre prevalece la ley de Gresham, nada impedirá que sobrevenga una oleada de estudios antropológicos aglutinados en torno a la consigna que reza que "todo lo que es dicho, es dicho por un observador". Sucederá como si la aceptación de ese truismo, que promueve sin ambages la reducción al sujeto, acarreara el disfrute de todo el repertorio de ideas de las teorías de la complejidad o legitimara la subordinación de éstas a la autopoiesis. Esta corriente habrá de ser la principal fuente de ruido para las nuevas epistemologías y métodos genuinamente complejos.

- Sería de lamentar que se desencadene un fetichismo de la complejidad, como el que se vislumbra en el modelo moriniano o en la investigación social de segundo orden, donde contemplar la realidad como si todo fuese innumerable e incierto ha devenido un imperativo existencial (Morin 1984: 26). La complejidad no es ni buena ni mala; no se es mejor científico sólo por tomarla en cuenta o por usar el vocabulario que se le refiere. Está por verse si la complejidad es dominante o esporádica, si se encuentra en todas partes o simplemente abunda un poco; por lo que se conoce, se manifiesta en los mismos objetos y procesos que, con otros valores de parámetro, podrían asentarse en un estado estable, periódico o aleatorio, reclamando entonces modelos de otra naturaleza.
- Las teorías y herramientas de la complejidad no son relevantes en todas las circunstancias; incluso allí donde sí lo son se debe recortar el objeto de maneras arbitrarias, que bien podrían ser inadmisibles desde la óptica de las disciplinas empíricas. Las teorías del caos sólo se aplican a realidades de muy baja dimensión intrínseca que admitan tratarse como sistemas cerrados con un número muy pequeño (preferentemente impar) de variables independientes o grados de libertad (Hilborn 2000: 4, 73; Cvitanović y otros 2002). Sólo en un modelo podrá encontrarse caos, porque éste es, aún en las ciencias duras, extremadamente difícil de descubrir en la realidad (Williams 1997; Leiber 1998: 23; Fauré y Korn 2001). No será fácil construir esos modelos en tanto nuestra materia prima consista en muestras limitadas, series temporales cortas, valores imprecisos, datos críticos no cuantificables, conductas no susceptibles de expresarse como reglas o funciones que no sean algorítmicamente descriptibles (Turing 1936; Agar 2003); algunos autores estiman que en ciencias sociales nunca se podrá hacer un uso razonable de los métodos utilizados en física para detectar conducta caótica (Troitzsch 1996: 162; Leiber 1998: 40). Aún cuando se obtenga un comportamiento interesante en el modelo, todavía restará establecer una interpretación empírica razonable de, por ejemplo, un atractor extraño, una dimensión fractal o una traza de recurrencia.
- Urge imponer lo que en pragmática se llamaría un principio de modestia y contemplar las prácticas particulares en una perspectiva más amplia. Las matemáticas de la complejidad y el caos son una parte pequeña de las matemáticas; la física de las estructuras disipativas y la dinámica no lineal son una fracción minúscula de la física; la computación adaptativa es una práctica periférica de las ciencias de la computación y está muy lejos de constituir su vanguardia. Puede que algún día las nuevas visiones promuevan otros tantos despertares en sus respectivas disciplinas, pero, siendo realistas, éste dista mucho de ser el caso aquí y ahora. Más moderados todavía debemos ser en ciencias sociales, donde sólo una parte ínfima de las teorías complejas puede ser comprendida e instrumentada; lo que pueda aplicarse, por añadidura, servirá más para comprender a grandes rasgos la naturaleza del problema que para proporcionar su solución.
- Aunque han venido en un momento oportuno y hayan alumbrado nuevos mundos, las epistemologías de la complejidad no son intrínsecamente superiores a cualesquiera otras. Algunas de ellas (aunque a mi juicio no sean en realidad complejas) hacen un triste papel frente a formas usuales del conocimiento. Contrástese, por ejemplo, la cognición de Varela con la mejor parte de la psicología, la antropología y la ciencia cognitiva; o el lenguajear de Maturana con las teorías lingüísticas del último cuarto de siglo; o las tres ecuaciones mal digeridas de Jesús Ibáñez con la destreza de antropólogos matemáticos como Dwight Read o Paul Kay. Tampoco los recursos computacionales de la compleji-

dad son siempre los mejores. Un sistema experto (un modelo mecánico) y una red neuronal de caja negra (un modelo estadístico) pueden simular algunos correlatos funcionales de la inteligencia humana, tales como la realización de inferencias o el reconocimiento de patrones; los sistemas adaptativos complejos han consumado una bella colección de pequeñas hazañas, pero todavía les resta mucho por andar.

- Las ciencias del caos y la complejidad son de verdad transdisciplinarias, y por ende más universalistas que particularistas (Feigenbaum 1981; Gleick 1987: 157-187; Tufillaro y otros 1990: 2-3; Hayles 1993: 36, 269). La naturaleza de esa universalidad ha sido caracterizada por Robert Rosen con inusual agudeza. La ciencia del caos –dice– nos proporciona *insight* sobre la naturaleza en general, independientemente del fenómeno o proceso que estemos observando. Nos permite, por ejemplo, estudiar la turbulencia como una cosa en sí misma, independiente de los fluidos turbulentos específicos. Un observador ortodoxo estudiaría, pongamos por caso, sólo el agua turbulenta, el aire o el aceite turbulento, y en tales casos *turbulento* sería sólo un adjetivo; un caólogo, en cambio, diría más bien que *turbulencia* es el nombre de la cosa, y que el fluido particular es el adjetivo modificador circunstancial (Rosen 2000b: 149, 193). Esto es lo que J. Cohen e I. Stewart (1994: 442) conciben como "complicidad": la ocurrencia del mismo rasgo emergente en sistemas de distinta materialidad.

- Las disciplinas podrán poner a prueba los modelos y herramientas complejos porque éstos no están ligados a (ni limitados al interior de) ninguna interpretación sustancial. Pero hay que decir que este universalismo es epistemológico y no ontológico; atañe a clases de universalidad y a las herramientas para tratarlas, sin que ello implique "universalidad" de los valores de atributos en el sentido antropológico tradicional de la palabra. Siempre existirá una dicotomía entre universalidad y especificidad; pero el estudio de principios universales no reemplaza ni excluye la descripción detallada y el estudio en profundidad de fenómenos particulares, sean ellos simples o complejos (Bar-Yam 1997: 2). Por el contrario, tanto la universalidad inherente a las ciencias abstractas como la adhesión particularista de las ciencias blandas a las singularidades de sus objetos son metodológicamente constitutivas de una transdisciplinariedad bien entendida. Lo ilustra muy bien Duncan Watts a propósito de las redes independientes de escala:

  > [S]in una perspectiva [abstracta] que nos orientara a pensar sobre emergencia global a partir de interacciones locales, nunca habríamos intentado abstraer las relaciones encarnadas en la red más allá de las relaciones sociales, y nunca habríamos podido ver la profunda similitud entre tantas clases diferentes de sistemas. Por otra parte, sin una sociología que nos estimulara y sin la insistencia de la realidad social de que las redes reales habitan una región entre el frío orden de las grillas y el desorden incontrolado de los grafos aleatorios, nunca habríamos pensado en plantear las preguntas correctas en primer lugar (Watts 2004: 100).

  En un marco complejo genuino cada disciplina conserva entonces su legitimidad. Como decía Philip Anderson (1972) en el enunciado anti-reduccionista más elocuente que conozco, "más es diferente". En cada nivel de organización hay leyes igualmente esenciales: la psicología no es biología aplicada, y la antropología no debería derivarse de la autopoiesis; para acercarse a la naturaleza de cualquier cosa, se puede hacer mucho más que descomponerla en (o supeditarla a) sus componentes fundamentales.

- La narrativa que juega el papel más crítico en las ciencias de la complejidad es, por el momento, la que concierne a la vida y la evolución. La física no es más que uno de los

dominios de aplicación y ya no es el que lleva la voz cantante. La biología tiene un papel algo más protagónico; hay razones para creer que la antropología también podría llegar a tenerlo, porque las ciencias que definan el valor de adecuación de las herramientas habrán de ser las que tengan el objeto más refractario a los tratamientos convencionales. Para algunos estudiosos de la complejidad, las ciencias sociales son, en el sentido estricto de la palabra, las verdaderas ciencias "duras" (Simon 1987; Epstein y Axtell 1996: 1).

- Quien haya prestado atención a la excitante descripción de John Holland de la compleja lógica que rige la auto-organización de la vida cotidiana en Nueva York (o del funcionamiento de la Web), o haya seguido los razonamientos de Alan Turing sobre la forma en que una semilla deviene una flor, o tome contacto con lo que hoy se sabe de clases de universalidad, emergencia, auto-organización y transiciones de fase en distintas disciplinas, habrá aprendido más sobre los asuntos que competen a la antropología de la complejidad y sobre las relaciones entre los sistemas totales y la agencia individual que lo que pudieron haberle enseñado en todos los años de formación curricular. Si se me permite recomendar sólo un conjunto de lecturas esenciales, rigurosas e inteligibles, sugeriría que el antropólogo comience por esa región (Turing 1952; Bak 1996; Holland 1998; Flake 1999; Ball 2001; Watts 2004). El resto vendrá por añadidura.
- En cuanto a resultados de excelencia en ciencia social compleja, creo que ya hay algunos más que decorosos: los hallazgos de Lansing a propósito del sistema de regadío balinés, los de Siromoney y Prusinkiewicz sobre los *kolam* de la India, los de Eglash sobre los patrones fractales en Africa, los de Getz sobre simetrías en el arte Xhosa y Zulu, los de Sakoda, Schelling y Hegselmann sobre segregación social, los de Strogatz, Watts y Barabási sobre mundos pequeños y redes sociales independientes de escala, los de Voss y Clarke sobre el carácter fractal de toda la música del mundo, los de May y Nowak sobre la difusión del SIDA, los de Torrens, Batty y Longley sobre el desarrollo histórico de las ciudades, los de Axelrod, Axtell y Epstein sobre agentes y sociedades artificiales, los de Reynolds sobre algoritmos culturales y tal vez media docena más. ¿Es poco? Sí, tal vez. Pero recién se está poniendo a punto la idea.

Creo honestamente que en los formalismos del caos y la complejidad se encontrará un promisorio conjunto de recursos, aún cuando en las ciencias sociales nunca se lleguen a implementar soluciones de estado de arte que parecen ser rutina en otros espacios del saber. Creo además, recordando las fallidas experiencias del estructuralismo, del análisis componencial o de la teoría sistémica clásica, que pocas veces tuvimos a la mano instrumentos semejantes, por más que el marco en el que se originan sea estrepitosamente provisional y se encuentre inacabado, escindido o expuesto a polémica. Las discusiones abiertas en el SFI o el LANL han logrado más de una vez que especialistas consagrados (Wolfram, Kauffman, Langton, Bak) cambien de idea y admitan la precariedad de sus propios intentos (Waldrop 1992; Lewin 1999). Cuando pregunté a Nick Hoggard si aún sostenía la validez de su cuadro cronológico desde el Big Bang al surgimiento de la Web basado en el número de Feigenbaum, me respondió que no estaba seguro de haber seguido el camino correcto y me señaló alternativas elaboradas por otros autores, mejor fundamentadas. Se sabe que Paul Rapp (1993; 1994), quien había creído demostrar la naturaleza caótica del comportamiento del sistema nervioso, cambió de parecer después de revisar elementos de juicio adicionales (Fauré y Korn 2001). Esta clase de autocrítica no se presenta todos los días entre los practi-

cantes de ciencia convencional; tampoco he sido capaz de encontrarla entre los posmodernos, los constructivistas o los que proclaman las virtudes de los sistemas observadores, congelados desde hace treinta años en torno de un conjunto de premisas del cual no se ha podido derivar una sola herramienta .

Con todas las limitaciones que se quiera, estimo que la posibilidad de trabajar sobre un problema en base al mapa logístico evaluando lo que puede llegar a suceder cuando las condiciones iniciales oscilan más allá de cierta magnitud; disponer de gramáticas simples que permiten generar expresiones visuales, acústicas o topográficas de complejidad arbitraria; poder comparar diversas manifestaciones culturales, tanto en su configuración observable como en sus estructuras subyacentes; tener acceso a un repertorio de prácticas para simbolizar y examinar procesos temporales; publicar los modelos para que otros investigadores los extiendan a otros casos o los sometan a inspección interna; perder el miedo a la cantidad, navegando con medios tecnológicos limitados espacios de búsqueda de proporciones que hubieran sido prohibitivas hasta hace poco; visualizar y manipular representaciones de procesos que nuestros predecesores en la disciplina apenas podían intuir; implementar modelos dinámicos con conductas creativas, y tantas otras capacidades como las que se han entrevisto, implican valores que bien justifican el precio que hay que pagar.

Los formalismos del caos y de la complejidad nos proponen un mundo a integrar que es de un género distinto a los que hemos frecuentado en las ciencias sociales. Si bien pueden entenderse como componentes de un horizonte paradigmático más amplio, su modo de producción y su estilo de existencia son diferentes a los de las grandes sistémicas. Aunque algunos genios excéntricos están haciendo un esfuerzo de cooptación en ese sentido, los formalismos no obedecen a un autor individual deseoso de establecer los lineamientos generales, codificar la normativa y liderar la corriente. Los algoritmos no resuelven todos los problemas, pero permitirán tal vez plantear algunos de ellos un poco mejor. En el mundo algorítmico, las alegaciones incapaces de soportar la prueba matemática no se mantienen mucho tiempo en vida. Tampoco se estimula la escritura de libros canónicos para ganar el corazón de los científicos sociales; se deja esa función a los que quieran ser celebridades o puedan ser divulgadores. Los trabajos de los creadores de algoritmos existen como *papers* y como *software,* disponibles en un espacio que no es como un discurso que expresa el pensamiento cristalizado de un solo pensador, sino como una población virtual de ideas y potenciales de acción que se auto-organizan en el filo del caos. Por el momento esas ideas no han cuajado como una teoría que se plantee a sí misma un proyecto de unificación y refiguración de las ciencias, aunque se perfilen más capaces de ese logro, en su conjunto, que muchas de las formulaciones que lo han intentado.

7. Indice de figuras

2.1 – Esquema de la comunicación. Diseño del autor, basado en Shannon (1948: 380).

2.2 – Retroalimentación. Diseño del autor, basado en Bertalanffy (1984: 43).

2.3 – Catástrofe de pliegue. Diseño del autor.

2.4 – Catástrofe de cúspide. Diseño del autor y modelado en Mathematica.

3.1 – Vecindades de von Neumann y Moore en autómatas celulares. Diseñado por el autor con Life32.

3.2 – Objetos fijos, periódicos y móviles – Pistola de Bill Gosper. Diseñado por el autor con Life32.

3.3 – Construcción de primitivas lógicas. Diseño del autor, basado en Flake (1999: 250).

3.4 – Autómatas celulares: Las cuatro conductas o clases de universalidad de Wolfram (1988).

3.5 – Reglas de autómatas celulares de Wolfram. Basado en Wolfram, http://mathworld.wolfram.com/Rule30.html y http://mathworld.wolfram.com/Rule250.html

3.6 – Esquema de Langton del espacio de reglas. Basado en Flake (1999: 244).

3.7 – Regla de mescolanza: estado inicial y fase. Simulado por el autor en Mirek's Cellebration – Reacción de Belusov-Zhabotinskii: fotografía de publicación soviética sin referencia.

3.8 – *Checkerboard model*, valencia de segregación (Sakoda 1971: 127).

3.9 – *Checkerboad model*, dinámica de la sospecha (Sakoda 1971: 126).

3.10 – Mancalas de Sierra Leone (extremos), oware de Ghana (centro) – Waterloo Museum.

3.11 – Patrones celulares en la cultura (Wolfram 2002: 43).

3.12 – Regla 126 de Wolfram y su codificación en Mirek's Cellebration.

3.13 – Redes booleanas aleatorias. Basado en DDLAB, clonado por el autor en Microsoft® Visual Basic.

3.14 – Cultura artificial Anasazi. Datos de campo y simulación, según Gumerman y otros (2002).

3.15 – Propagación de cultura según modelo basado en agentes de Axelrod (1997), ejecutado por el autor.

3.16 – Red neuronal de tres capas con alimentación hacia adelante procesando la letra "M" en el programa JavaNNS.

3.17 – Red neuronal NETtalk de Terrence Sejnowski y Charles Rosenberg. Entrenada por el autor con el programa JavaNNS.

3.18 – *Crossover* en algoritmo genético. Basado en Flake (1999: 351).

3.19 – Diagrama del algoritmo genético original. Adaptado de Koza (1992).

3.20 – Evolución de la adecuación en un algoritmo genético. Programado por Eduardo Jezierski (Reynoso y Jezierski 2002).

3.21 – Evolución de población de biomorfos de Dawkins. Ejecutado por el autor en Genetic Algorithm Viewer. Población de 24 ejemplares, con valores de parámetro por defecto.

4.0 – Gráficos de línea de ecuación logística. Elaborados por el autor en Microsoft® Excel y Chaos for Java.

4.1 – Atractores de Lorenz. Ejecutados por el autor en Chaos for Java.

4.2 – Bifurcación (diagrama de órbita). Diseñado por el autor sobre imagen de Winfract.

4.3 – Número de Feigenbaum en la secuencia evolutiva según Nick Hoggard. Graficado por el autor en Microsoft® Excel.

4.4 – Red aleatoria y red independiente de escala. Adaptado de Barabási y otros (2002).

4.5 – Trazas de recurrencia de series temporales. Generadas por el autor en Visual Recurrence Analysis.

4.6 – Patrones de auto-organización en la naturaleza. Inspirado en imágenes compiladas por Scott Camazine, (http://www.scottcamazine.com/personal/research/index.htm). Fotografías del autor.

5.1 – Fractal de Mandelbrot. Diseñado por el autor con ChaosPro – Magnificación de una región del conjunto de Mandelbrot sobre el eje real negativo, generada con Winfract.

5.2 – Polvo de Cantor. Generado por el autor con ChaosPro.

5.3 – Polvo de Cantor. Idem.

5.4 – Curva de Koch. Generada por el autor con ChaosPro.

5.5 – Ruido blanco, caótico y browniano. Gráficos y partitura generadas por el autor, basado en Gardner (1978).

5.6 – Leonardo Da Vinci, Diluvio, ca. 1514, dominio público – Montañas de plasma. Generadas por el autor con ChaosPro.

5.7 – Tatuaje tradicional Maorí del siglo XIX, dominio público – Bajorrelieve Maorí de la Embajada de Nueva Zelanda en Washington. Jean Guiart, *Oceanía*. Bilbao, Aguilar, 1963, p. 356.

5.8 – Uroboros (probablemente) azteca, aborigen de América del Norte y anónimo europeo. Dominio público.

5.9 – Helecho (IFS – Fern) – Espiral (IFS – Spirals). Generados por el autor con Winfract.

5.10 – Cruces (IFS). Diseñada por el autor con Brazil.

5.11 – Patrones de diseño Zulu – *Iphoco* Xhosa y *ubeshana* Zulu según Chonat Getz, http://sunsite.wits.ac.za/-math/frieze.htm.

5.12 – Triángulo de Sierpiński (L-System) – Arbol (L-System). Generado por el autor con ChaosPro.

5.13 – Simulación y ejemplar de cruz etíope. Basado en Eglash (1997: 136).

5.14 – *Kolam* Tamil según Przemyslaw Prusinkiewicz, http://classes.yale.edu/fractals/Panorama/Art/Kolams/-Kolams.html. Generado por el autor con FracTree – Diseños *Rangoli* recolectados por el autor.

5.15 – Mosaico de Maurits Escher, dominio público – Curvas de Cesàro (L-system). Diseñado por el autor con ChaosPro.

5.16 – Textil Showa con teselación modulada. Fotografía del autor – Pinturas *sona* de los Chokwe según Paulus Gerdes (1997: 77, 76).

5.17 – Dorso del espejo celta de Desborough. British Museum – Patrones ornamentales celtas según I. M. Stead, *Arte Celta*. Madrid, Akal, 1999, p.42.

5.18 – *Kraal* Ba-ila de Zimbabwe. Basado en Eglash (1997: 27).

5.19 – Biomorfos. Generados por el autor con Biomorfos de Pickover (Segarra 2001).

5.20 – Paisaje de simulación de templado. Gráfico generado por el autor con el programa Anneal del repositorio de Alberto Moreira – Planta urbana de Berlín, real y simulada (Makse y otros 1998: 4).

5.21 – Diseños Hanti-Manysi según Bérczi (2000) y patrones islámicos en estrella elaborados por el autor con Taprats.

8. Herramientas de modelado utilizadas

Los programas que se mencionan en esta lista han sido utilizados en la producción de las imágenes de este libro, o para examinar diversas cuestiones técnicas tratadas en su desarrollo. La lista proporciona los datos esenciales de denominación, tipo de aplicación y autores, a fin de que se las pueda localizar en el sitio en que se encuentren en la Web o en el repositorio del autor. Se han marcado con asterisco las herramientas recomendadas para la investigación científica o de alta calidad técnica.

ABIR (Modelado basado en agentes) – Versión 1.0.1.0.1 © 1998, Vladimir Dergachev

Alberto Moreira's Repository (Anneal, Evol, Hill, Panneal, Tabu) – © 2002, Alberto Moreira.

*A Musical Generator – Versión 3.0.0.557 © 1997-2002, Arnold Reinders, MuSoft Builders

*Apophysis (Flame fractals) – Versión 2.02 © 2005, Scott Draves, Frederik Slijkerman

*AScape (Modelado basado en agentes) – Versión 1.9 © 1998-2000, The Brookings Institution

Attractors & Co (Generador fractal) – Versión 2.10 © 1991-1999, Pascal Leclercq

Blanche (Modelado basado en agentes) – Versión 4.6.5 © 2002, The Board of Trustees-University of Illinois & Noshir Contractors

*Brazil Design (IFS) – Versión 0.5 Beta © 1998, David Chardonnet

BZ Phase (Reacciones químicas, atractores) – Versión 1.50 © 2000, Andrew Pyzhkov

Cellfish (Biomorfos de Dawkins) – Versión 2.0 © Robin Barrett, Stephen Cox

Cellular Automata Model – © 2003, James Watson

Cellular Automata Viewer – Versión 2.0 © 2002, Jean-Philippe Rennard

*Chaos for Java (Dinámica no lineal) – Versión 1.2.3 © 2004, Brian Davis.

*Chaoscope (Generador fractal, atractores extraños) – Versión 0.2.1 © 2003-2004, Nicholas Desprez

*ChaosPro (Fractales, Dinámica no lineal) – Versión 3.2 © 1997-2004, Martin Pfingstl

DDLAB (Sistemas complejos adaptativos) – Versión 24 © 2002, Andy Wuensche

D-Frac (Generador fractal) – Versión 2.7.18 © 1998-2002, Daan Scherft

Dyna32 (Dinámica no lineal) – Versión 0.9 © Renate Schaaf

Dynamics Solver – Versión 1.56 © 1992-2005, Juan M. Aguirregabiria

*Estudio de Programación Genética – Versión 1.0 © 1998 Universidad de Córdoba

Fantastic Fractals 98 – Versión 7.0.5.6 © 1995-1998, John Sheu

Flight from Fractal – Versión 0.10K Beta © 2000, Mitsutoshi Naruse

Fractal Analysis – Versión 3.4 © 1998-2002, NILGS-NARO (Hiroyuki Sasaki)

Fractal Analysis of Contours – Versión 1.0 © 1993-2000, Volodymyr Kindratenko

Fractal Builder – Versión 0.9 Alpha © 1999-2000, Aleksey Kravchenko – The Infinite Fractal Loop

Fractal Explorer – Versión 2.02 © 2005, Sirotinsky Arthur & Olga Fedorenko

Fractal eXtreme – Versión 1.902 © 1997-2003, Cygnus Software

*Fractal Forge – Versión 2.8.2 © 2005, Uberto Barbini

*Fractal Games (Fractal Play) (Sistemas-L) – Versión 1.0 © T. Fischer

*Fractal Studio – Versión 0.96 © 2005, BFF

*Fractal Tune Smithy (Música fractal) – Versión 2.4 © 2003, Robert Inventor

Fractal Vision for Windows – Versión 1.40c © 1993, Al Bupp, Daniel Hoviss

Fractals Show – Versión 2.0 © 2000, efg's Computers Lab

*Fractalus (Generador fractal) – Versión 4.03 © 2002, Kari Korkeila

*FractMus 2000 (Música fractal) – © 1997-1999, Gustavo Díaz Jerez

*Fractop (Dimensión fractal) – Versión 1.31 © 2002-2003 Leighton Weymouth, Charles Sturt University

*FracTree (Sistemas-L) – Versión 1.0 © 1993, Michael Shernan

Generator Fraktali – Versión 2004.04 © 2001-2004, Krzysztof Wojtas

*Genetic Algorithm Viewer – Versión 1.2 © 2000, Jean-Philippe Rennard

GF4 (Generador fractal) – Versión 2.0 RC1 © 1999-2000, Peter Pawlowski

*HarFA – Harmonic and Fractal Image Analyzer – Versión 4.9.3 © 1999-2001, Zmeškal-Nežádal

*IFS Construction Kit – © 2004, Larry Riddle

IFS Design – © S/f, Renate Schaaf

Ilya (Modelado de reacción-difusión) – © 1997, Future Skill Software

*Inwards to Chaos (Fractales, dinámica no lineal) – © 2001, Alessandro Rossa

Java Neural Network Simulator – Versión 1.1 © 1996-2002 WSI, Universidad de Tübingen

JFLAP (Teoría de autómatas, simulador) – Versión 4.0 © 2004, Susan Rodger, Thomas Finley & al.

Kahala (Juego de Mancala) – Versión 2.3 © 1995-2003, Klaas Bonnema

*Kandid (Diseño genético) – Versión 1.0 – ©Source Forge

*Life32 (Autómatas celulares) – Versión 2.15 © 2002, Johan Bontes

*LinSys3d – Versión 1.2.0.0 © 2001, Andrea Esuli

LotkaVolt (Modelo predador-presa) – Versión 1.0b © 1998, Hendrik Blok

LS Sketch Book – Versión 0.1b © 2000, Roberto Ferrero

*Lstudio (Sistemas-L) – Versión 4.0.37 © 2005, Przemyslav Prusinkiewicz

*LSystem4 – Versión 4.01 © 1999, Timothy C. Perz

LSystems Explorer – Versión 1.1 © 2001-2002, J. Matthews

Lsystems Fractal Generator – Versión 1.6 © 2003, HeliSoft, Miroslav Olenjin

*ManpWin (Generador fractal) – Versión 2.8k © 2004, Paul De Leeuw Computers

*Mind Boggling Fractals Lite – Versión 2.3 © 2001, Paul Carlson

*Mirek's Cellebration (Autómatas celulares) – Versión 4.20.0.500 © 2001, Mirek Wójtowicz

Moduleco – Versión 1.47 © 2005, Gilles Daniel

Net Expression (Redes booleanas aleatorias) – Versión 1.0 © 2003, James Watson

*NeuroSolutions (Redes neuronales) – Versión 4.24 © 1994-2003, Neuro Dimensions, Inc.

NKS Test (Autómatas celulares para *A New Kind of Science*) – © 2003, Ron Thomas

*Phaser (Dinámica no lineal) – Versión 2.1 © 2003, Phaser Scientific Software

Quat (Generador de cuaterniones) – Versión 1.20 © 1997-2002, Dirk Meyer

Quintessential Sofistry W95 Fractals – © 1996, Michael Sargent

Raimuraito (Generador fractal) – Versión 1.7a © 2002, Yasuo Kamei

Repast (Modelado basado en agentes) – Versión 3.0 © 2003, University of Chicago Social Science Research

Salomo (Generador fractal) – Versión 2.0 © 1997-1999, Niko Wilbert

SoftStep Player (Música fractal y evolutiva) – Versión 3.1 © 1999-2003, John Dunn & Algorithmic Arts

*StarLogo (Modelado de Auto-organización) – Versión 2.1 © 2004, Massachusetts Institute of Technology

SteveCIFS (IFS) – Versión 1.0 © 1997-2000, Damien Jones

*Taprats (Simetrías) – Versión 0.4 © 2001, Craig S. Kaplan

*Tess (Simetrías) – Versión 1.63 © 2003, Pedagoguery Software

Tiera-Zon (Generador fractal) – Versión 2.8 © 1998-1999, Stephen C. Ferguson

*Ucinet (Redes sociales) – Versión 6 © 2005, Borgatti, Everett y Freeman

*UltraFractal (Generador fractal) – Versión 3.02 © 1997-2003, Frederik Slijkerman

*Visions Of Chaos (Fractales, autómatas, simulaciones) – Trial Version 41.2 © 2005, Jason Rampe

*Visual Recurrence Analysis – Versión 4.7 © 2004, Eugene Kononov

*Visual Turing (Máquina de Turing) – Versión 1.0 © Cristian Cheran

Windisc (Redes y gráficos) – Versión 19 de marzo de 2005 © Peanut Software

*Winfract (Generador fractal) – Versión 18.21 © 1993, Stone Soup Group

*XenoDream (Generador fractal) – Versión 1.203 © 2003, XenoDream Software, LLC

9. Referencias bibliográficas

Abel, Tom. 1998. "Complex adaptive systems, evolution, and ecology within Anthropology". *Georgia Journal of Ecological Anthropology*, 2: 6-29.

Abraham, Ralph. 2002. "The genesis of complexity". http://www.ralph-abraham.org.

Adams, Richard Newbold. 1978. *La red de la expansión humana*, México, La Casa Chata.

- 1983 [1975]. *Energía y estructura. Una teoría del poder social*. México, Fondo de Cultura Económica.
- 2001. *El octavo día. La evolución social como autoorganización de la energía*. México, Universidad Autónoma Metropolitana.

Addison, Paul. 1997. *Fractals and chaos. An illustrated course*. Londres, Institute of Physics Publishing.

Affergan, Francis. 1997. *La pluralité des mondes. Vers une autre anthropologie*. París, Albin Michel.

Agar, Michael. 2003. "My kingdom for a function: Modeling misadventures of the innumerate". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(3), http://jasss.soc.surrey.ac.uk/6/3/8.html.

- 2005. "Agents in living color: Towards emic agent-based models". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8(1), http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/1/4.html.

Allen, Peter M. 1992. *Cities and regions as self-organizing systems: Models of complexity*. Nueva York, Columbia University Press.

Anderson, Carl. 2002. "Self-organization in relation to several similar concepts: Are the boundaries of self-organization indistinct?". *Biology Bulletin*, 202: 247-255.

Anderson, Philip. 1973. "More is different". *Science*, 177: 393-396.

Anton-Luca, Alexandru. S/f. Comunicación personal de Clifford Geertz. http://www.indiana.edu/~wanthro/-bateson.htm.

Aracil, Javier. 1983. *Introducción a la dinámica de sistemas*, Madrid, Alianza.

Arcidiacono, Giuseppe y Salvatore Arcidiacono. 1991. *Entropia, sintropia, informazione*. Roma, Di Renzo Editore.

Argyros, Alexander. 1991. *A blessed rage for order: Deconstruction, evolution and chaos*. Ann Arbor, University of Michigan Press.

Arlinghaus, Sandra Lach. 1985. "Fractals Take a Central Place". *Geografiska Annaler,* 67 B(2): 83-88.

- 1993. "Central Place Fractals: Theoretical Geography in an Urban Setting". En: Nina Siu-Ngan Lam y Lee De Cola (comps.), *Fractals in Geography*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, pp. 213-227.

Arneodo, Alain, Pierre Coullet y Charles Tresser. 1980. "Occurrence of strange attractors in three-dimensional Volterra equations", *Physics Letters,* 79A(4): 259-263.

Arnol'd, Vladimir I. 1989. *Teoría de catástrofes*. Madrid, Alianza.

Arrowsmith, David y C. M. Place. 1990. *An introduction to dynamical systems*. Cambridge, Cambridge University Press.

Ashby, W. Ross. 1947. ""Principles of the Self-Organizing Dynamic System", *Journal of General Psychology,* 37: 125-128.

- 1958. "General Systems Theory as a new discipline". *General Systems*, 3: 1-6.
- 1960 [1952]. *Design for a brain*. 2ª edición, Nueva York, Wiley.

- 1962. “Principles of the self-organizing system”. En: Heinz von Foerster y George Zoopf, jr (comps.), *Principles of Self-organization: Transactions of the University of Illinois Symposium*, Londres, Pergamon Press, pp. 255-278.

- 1968. “Variety, constraints, and the law of requisite variety”. En: W. Buckley (comp.), *Modern systems research for the behavioural scientist*. Chicago, Aldine.

- 1972a [1956]. *Introducción a la cibernética*. 2ª edición, Buenos Aires, Nueva Visión.

- 1972b. “Sistemas y sus medidas de información”. En: George Klir (comp.), *Op. cit.*, pp. 95-117.

- 2004 [1962]. “Principles of the self-organizing system” [Re-edición, prólogo de Jeffrey Goldstein]. *E:CO*, 6(2), 102-126.

Aspray, William. 1993. *John von Neumann y los orígenes de la computación moderna*. Barcelona, Gedisa.

Atlan, Henri. 1983. “La emergence du nouveau et du sens”. En: P. Dumouchel y J.-P. Dupuy (comps.), *L’Auto-Organisation, de la physique au politique*. París, Éditions du Seuil, pp. 115-138.

- 1991 [1986]. *Con razón y sin ella. Intercrítica de la ciencia y el mito*. Barcelona, Tusquets.

Aubin, David. 1998. “A Cultural History of Catastrophes and Chaos: Around the Institut des Hautes Études Scientifiques, France 1958-1980”, Tesis de Doctorado, Universidad de Princeton, UMI #9817022.

Aubin, David y Amy Dahan Dalmedico. 2002. “Writing the history of dynamical systems and chaos: Longue durée and revolution, disciplines and cultures”. *Historia Mathematica* 29: 273-339.

Aunger, Robert (editor). 2000. *Darwinizing culture. The status of memetics as a science*. Oxford, Oxford University Press.

Axelrod, Robert. 1984. *The evolution of cooperation*. Nueva York, Basic Books.

- 1985a. “Modeling the evolution of norms”. Trabajo presentado en *American Political Science Association Meeting,* Nueva Orleans, agosto.

- 1985b. “The simulation of genetics and evolution”. Trabajo presentado en la *Conference on Evolutionary Theory in Biology and Economics*, Universidad de Bielefeld, noviembre.

- 1997. *The complexity of cooperation*. Princeton, Princeton University Press.

Back, Kurt. 1997. “Chaos and Complexity: Necessary myths”. En: R. Eve, S. Horsfall y M. Lee (comps.), *Op.cit.*, pp. 39-51.

Bak, Per. 1994. “Self-organized criticality: A holistic view of nature”. En: G. Cowan, D. Pines y D. Meltzer (comps.), *Complexity: Metaphors, Models, and Reality,* Vol. 19, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Reading, Addison-Wesley, pp. 477–495.

- 1996. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*, Nueva York, Springer.

- 1997. “Challenging the timelord”. *New Scientist*, 6, setiembre.

Bak, Per y Kan Chen. 1991. “Self-organized criticality”. *Scientific American,* 264(1): 46–53.

Bak, Per y Chao Tang. 1988. “Self-organized criticality”. *Physics Review A,* 38: 364 y ss..

Balandier, Georges. 1988. *El desorden: La teoría social y las ciencias del caos*. 2ª edición, Barcelona, Gedisa.

Bale, Lawrence. 1995. “Gregory Bateson, cybernetics, and the social/behavioral sciences”. *Cybernetics & Human Knowing*, 3(1): 27-45.

Ball, Philip. 2001. *The self-made tapestry: Pattern formation in nature*. Oxford, Oxford University Press.

Banathy, Bela H. 1996. *Designing social systems in a changing world*. Nueva York, Plenum Press.

Banzhaf, Wolfgang, Jason Daida, Agoston E. Eiben, Max H. Garzon, Vasant Honavar, Mark Jakiela, Robert E. Smith (comps.). 1999. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, julio 13-17, Orlando. San Francisco, Morgan Kaufmann.

Bar-Yam, Yaneer. 1997. *Complex systems*. Reading, Addison-Wesley.

Barabási, Albert-László. 2003. *Linked: How everything is connected to everything else and what it means*. Nueva York, Plume Books.

Barabási, Albert-László y Eric Bonabeau. 2003. "Scale-free networks". *Scientific American*, 288(5): 50-59.

Barabási, Albert-László, Zoltán Dezsö, Erzsévet Ravasz, Soon-Hyung Yook y Zoltán Oltvai. 2002. "Scale-free and hierarchical structures in complex networks". http://www.nd.edu/~networks/PDF/Proceeding-%20Sitges2004.pdf.

Barbour, Ian. 1990. *Religion in an age of science*. San Francisco, Harper.

Barceló, Juan. 2005. "Recents advances in classification methods: Neural networks in archaeology". Ms.

Barnsley, Michael. 1989. "Iterated function systems". *Proceedings of the Symposia of Applied Mathematics*, Providence, vol. 39.

- 1993. *Fractals everywhere.* 2ª edición, Boston, AP Professional.

Bartels, Dennis. 1981. "Catastrophe Theory and dialectical change in Guyanese race and class relations", *Current Anthropology*, 22(4): 435-436.

Bashkow, Ira, Matti Bunzl, Richard Handler, Andrew Orta y Daniel Rosenblatt. 2004. "Introduction: A New Boasian Anthropology: Theory for the 21st Century". *American Anthropologist*, 106(3): 433-435.

Bateson, Gregory. 1958 [1936]. *Naven*, 2ª edición, Londres, Oxford University Press.

- 1966. "Slippery theories. Comment on *Family interaction and schizophrenia: A review of current theories*", by Elliot Mischler y Nancy Waxler, *International Journal of Psychiatry*, 2(4): 415-417.

- 1972. *Steps to an Ecology of Mind*. Londres, Granada.

- 1981 [1979]. *Espíritu y naturaleza*, Buenos Aires, Amorrortu.

- 1985 [1972]. *Pasos hacia una ecología de la mente*, Buenos Aires, Carlos Lohlé.

- 1991. *A sacred unity. Further steps to an Ecology of Mind*. Nueva York, HarperCollins.

Bateson, Gregory y Mary Catherine Bateson. 1989. *El temor de los ángeles*. Barcelona, Gedisa.

Bateson, Gregory y Jürgen Ruesch. 1984. *Comunicación*: *La matriz social de la psiquiatría*, Buenos Aires, Paidós.

Bateson, Mary Catherine. 1989. *Como yo los veía. Margaret Mead y Gregory Bateson recordados por su hija*. Barcelona, Gedisa.

- 1992. "Cómo nació *Angels Fear*". En: Yves Winkin (comp.), *Op. cit*., pp.23-36.

Batterman, Robert W. 1991. "Randomness and Probability in Dynamical Theories: on the Proposals of the Prigogine School". *Philosophy of science*, (58): 241-263

Batty, Michael y Paul Longley. 1994. *Fractal cities: A geometry of form and function*. Londres y San Diego, Academic Press.

Batty, Michael, Helen Couclelis y Mark Eichen. 1997. "Urban systems as cellular automata". *Environment and Planning B*, 24(2): 159-164.

Batty, Michael, Philip Steadman y Yichun Xie. 2004. "Visualization in Spatial Modeling". *CASA Working Paper*, 79, University College of London.

Batty, Michael y Yichun Xie. 1997. "Possible urban automata". *Environment and Planning B – Planning and Design*, 24: 275-292.

Baudrillard, Jean. 1992. *L'Illusion de la fin*. París, Galilée.

Baumol, William y Jess Benhabib. 1989. "Chaos: Significance, mechanisms, and economic applications". *Journal of Economic Perspectives*, 3: 77-105.

Bausch, Kenneth. 2002. "Roots and branches: a brief, picaresque, personal history of systems theory". *Systems Research and Behavioral Science*, 19(5): 417-428.

Bebchuck, José. 1987. "Pragmática de la comunicación humana", *La Razón*, 19 de abril, Suplemento de Psicología, pp. 2-3.

Behncke, Rolf. 2003. "Al pie del árbol". Prólogo para *El árbol del conocimiento*, Buenos Aires, Lumen.

Bense, Max. 1972. *Introducción a la estética informacional*. Madrid, Alberto Corazón Editor.

Bentley, Alexander. 2003. "Scale-free network growth and social inequality". En: A. Bentley y H. Maschner (comps.), *Op. cit*., pp. 27-45.

Bentley, Alexander y Herbert Maschner. 2001. "Stylistic change as a self-organized critical phenomenon: An archaeological study in complexity". *Journal of archaeological method and theory*, 8: 35-66.

Bentley, Alexander y Herbert Maschner (editores). 2003. *Complex systems and archaeology: Empirical and theoretical applications*. Salt Lake City, University of Utah Press.

Bentley, Peter (comp.). 1999. *Evolutionary design by computers*. San Francisco, Morgan Kaufmann.

Bentley, Peter y David Korne (comps.). 2002. *Creative evolutionary systems*. San Francisco, Morgan Kaufmann.

Bérczi, Szániszó. 2000. "Katachi U simmetry in the ornamental art of the last thousands of years of Eurasia". *Forma*, 15: 15.28.

Berlinski, David. 1976. *On systems analysis: An essay concerning the limitations of some mathematical methods in the social, political and biological sciences*. Cambridge (Massachusetts), MIT Press.

Berman, Morris. 1989. "The roots of reality: Maturana and Varela's *The Tree of Knowledge*". *Journal of Humanistic Psychology*, 2(2): 277-284.

- 1996. "The shadow side of systems theory". *Journal of Humanistic Psychology*, 36(1): 28-54.

Bertalanffy, Ludwig von. 1974 [1966]. *Robots, hombres y mentes. La psicología en el mundo moderno*, Madrid, Guadarrama.

- 1976. *Teoría general de los sistemas*, México, Fondo de Cultura Económica.
- 1982 [1975]. *Perspectivas en la teoría general de sistemas*. 2ª edición, Madrid, Alianza.
- 1984. "Historia y situación de la Teoría General de Sistemas". En: G. Klir (comp.), *Op. cit.*, pp. 29-53.

Biggiero, Lucio. 1998. "Are firms autopoietic systems". En: G. van der Zouwen y F. Geyer (comps.) *Sociocybernetics: Complexity, Autopoiesis, and Observation of Social Systems*. Westport, Greenwood, pp. 125-140.

Biles, John. 2004. "GenJam: Overview, history and gear". http://www.it.rit.edu/~jab/GenJam.html.

Bintliff, John L. (1997). "Catastrophe, chaos, and complexity: The death, decay, and rebirth of towns from antiquity to today". *Journal of European Archaeology* 5(2): 67–90.

- 2003. "Searching for structure in the past – Or was it 'One damn thing after another'". En: A. Bentley y H. Maschner (comps.), *Op. cit.*, pp. 79-84.

Birch, Jim. 1991. "Re-inventing the already punctured wheel: Reflections on a seminar with Humberto Maturana", *Journal of Family Therapy*, 13(4): 349-373.

Bloch, Maurice. 2000. "A well-disposed social anthropologist's problems with memes". En: R. Aunger (comp.), *Op. cit.*, pp. 189-204.

Boccaletti, Stefano, Celso Grebogi, Ying-Cheng Lai, H. Mancini y Diego Maza. 2000. "The control of chaos: Theory and applications". Amsterdam, Elsevier, *Physics Reports* 329: 103-197.

Boccara, Nino. 2004. *Modeling complex systems*. Nueva York, Springer.

Boden, Margaret. 2000. "Autopoiesis and life". *Cognitive Science Quarterly*, 1: 117-145.

Bogdanov, Alexander. 1980 [1912]. *Essays in Tektology*. Seaside, Intersystems.

Bogucki, Peter. 2003. "The Neolithic settlement of Riverine Interior Europe as a complex adaptive system". En: A. Bentley y H. Maschner (comps.), *Op. cit.*, pp. 93-102.

Bohm, David. 1980. *Wholeness and the implicate order*. Nueva York, Routledge.

Böhme, Gernot. 1997. "Perspectivas de una filosofía de la naturaleza de orientación ecológica". En: H. R. Fischer y otros (comps.), *Op. cit.*, pp. 71-83.

Borzeskowski, Horst-Heino y Renate Wahsner. 1984. "Nonlinear Irreversible Thermodynamics". *Foundations of Physics.* 14(7): 653-670.

Boudon, Raymond. 1984. *La place du désordre, critique des theories du changement social*. París, P.U.F.

Boulding, Kenneth. 1968. "General systems theory: The skeleton of science". En: Walter Buckley (comp.), *Op. cit.*, pp. 3-10.

- 1978. *Ecodynamics: A new theory of societal evolution*. Beverly Hills, Sage Publications.

Bouveresse, Jacques. 1984. *Rationalité et cynisme*. París, Éditions de Minuit.

- 2000. *Prodigios y vértigos de la analogía*. Buenos Aires, Libros del Zorzal.

Bricmont, Jean. 1996. "Science of chaos or chaos in science?". En: P. Gross, N. Levitt y M. Lewis (comps.), *Op. cit*., pp. 131-176.

Briggs, John. 1992. *Fractals – The Patterns of Chaos*. Nueva York, Touchstone Books, Simon & Schuster.

Brockman, John (comp.). 1978. *About Bateson*. Londres, Wildhouse.

Brockman, John. 2000 [1995]. *La tercera cultura. Más allá de la revolución científica*. 2ª edición, Barcelona, Tusquets.

Brown, Thad. 1997. "Measuring chaos using the Lyapunov exponent". En: L. D. Kiel y E. Elliott (comps.), *Op. cit.*, pp. 53-66.

Bruch, Ewa. 1994. *The evolution of cooperation in neighborhood structures*. Bonn, Bonn University (mecanografiado).

Brunk, Gregory. 2002. "Why do societies collapse?: A theory based on self-organized criticality". *Journal of Theoretical Politics*, 14(2): 195-230.

Buckley, Walter. 1970 [1967]. *La sociología y la teoría moderna de los sistemas*, Buenos Aires, Amorrortu.

- 1974. "Théorie des systémes et anthroposociologie". En: E. Morin y M. Piattelli-Palmarini (comps.), *Pour una anthropologie fondamentale*, París, Editions du Seuil, t. 3, pp. 153-166.

- 1984. "La epistemología, vista a través de la teoría de sistemas". En: G. Klir (comp.), *Op. cit.*, pp. 219-236.

- (comp.) 1968. *Modern systems research for the behavioral scientist*. Chicago, Aldine.

Buckley, Walter y Solomon Katz. 1974. "Le paradigme de l'information". En: E. Morrin y M. Piattelli-Palmarini (comps.), *Op. cit*., pp. 151-2.

Builder, Carl y Steve Bankes. 1991. "Artificial societies: A concept for basic research on the societal impacts of information technology". *RAND Report R-7740*, Santa Monica, RAND Corporation.

Bulhak, Andrew C. 1996. “On the simulation of postmodernism and mental debility using recursive transition networks”, *Technical report CS 96/264*, Department of Computer Science Technical Reports, Monash University, Melbourne.

Bunge, Mario. 1956. “Do computers think?”. *British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 7.

- 1977. “The General Systems Theory Challenge to the Classical Philosophies of Science”, *International Journal of General Systems.* 4: 29-37.

- 2004. *Emergencia y convergencia. Novedad cualitativa y unidad del conocimiento*. Barcelona, Gedisa.

Bunzl, Matti. 2004. “Boas, Foucault, and the ‘native anthropologist’: Notes toward a neo-Boasian anthropology”. *American Anthropologist*, 106(3): 435-442.

Butts, Carter. 2001. “The complexity of social networks: Theoretical and empirical findings”. *Social Networks*, 23: 31-71.

Byrne, David. 1998. *Complexity theory and the social sciences: An introduction*. Londres y Nueva York, Routledge.

Camazine, Scott, Jean-Louis Deneubourg, Nigel Franks, James Sneyd, Guy Theraulaz y Eric Bonabeau. 2003. *Self-organization in biological systems*. Princeton, Princeton University Press.

Campbell, David, James Crutchfield, Doyne Farmer y Erika Jen. 1985. “Experimental mathematics: the role of computation in nonlinear science”. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 28(4): 374-84.

Cannon, Walter B. 1932. *The wisdom of the body*. Nueva York, W.W. Norton.

Capra, Fritjof. 1984 [1975]. *El Tao de la física*. Madrid, Luis Cárcamo.

- 1994. *Sabiduría insólita. Conversaciones con personajes notables*. 2ª edición, Barcelona, Kairós.

- 1996. *The web of life: A new scientific understanding of living systems*. Nueva York, Anchor Books. [Traducción al portugués: *A teia da vida*. São Paulo, Cultrix, 1997].

- 2003. *Las conexiones ocultas*. Barcelona, Anagrama.

Carroll, Thomas. 2005. “Chaotic systems that are robust to added noise”. *Chaos*, 15.

Castelfranchi, Cristiano. 1998. “Modelling social action for AI agents”. *Artificial Intelligence,* 103: 157-182.

Casti, John. 1995. *Complexification: Explaining a paradoxical world through the science of surprise*. Nueva York, Harper-Collins.

Cavanagh, William G. y Robert R. Laxton. 1994. “The Fractal Dimension, Rank-Size, and the Interpretation of Archaeological Survey Data”. En: Ian Johnson (comp.), *Methods in the Mountains: Proceedings of UISPP Commission IV Meeting, Mount Victoria, Australia, Agosto de 1993*, University Archaeological Methods Series Vol. 2, pp. 61-64.

Chaitin, Gregory. 1975. “Randomness and mathematical proof”. *Scientific American*, mayo, 232: 47-52.

- 1987. *Algorithmic information theory*. Cambridge, Cambridge University Press.

Chen, Guanrong y Xinghuo Yu (comps.) 2003. *Chaos Control: Theory and Applications*, Nueva York, Springer-Verlag.

Chomsky, Noam. 1959. “On certain formal properties of grammars”. *Information and Control*, 2(2): 137-167.

Cilliers, Paul. 1998. *Complexity and postmodernism. Understanding complex systems*. Londres y Nueva York, Routledge.

Clarke, David. 1968. *Analytical archaeology*. Londres, Methuen.

Cohen, J. y I. Stewart. 1994. *The collapse of chaos*. Nueva York, Penguin.

Colby, Benjamin. 1977. “La redundancia en el comportamiento”. En: A. G. Smith (comp.), *Op. cit.*, t. 2, pp. 311-322.

Colby, Benjamin y Lore Colby. 1981. *The Daykeeper. The life and discourse of an Ixil diviner*. Cambridge [Massachusetts], Harvard University Press.

Collier, John. 2002. “What is Autonomy?”. *International Journal of Computing Anticipatory Systems*: CASY 2001 – Fifth International Conference.

Cottone, Rocco. 1989. “The third epistemology: Extending Maturana's structure determinism”. *American Journal of Family Therapy*, 17(2): 99-109.

Coult, Allan. 1968. “Use and abuses of computers in Anthropology”. En: *Calcul et formalisation dans les Sciences de l’homme*, París, CNRS, pp. 21-29.

Coveney, Peter. 1988. “The second law of thermodynamics: Entropy, irreversibility, and dynamics”. *Nature*, 333: 409-415.

Coveney, Peter y Roger Highfield. 1995. *Frontiers of complexity: the search for order in a chaotic world*. Nueva York, Fawcett Columbine.

Cowan, Jack y David Sharp. 1993. “Redes neuronales e Inteligencia Artificial”. En: S. Graubard (comp.), *Op. cit.*, pp. 103-144.

Crick, Francis. 1989. “Neural Edelmanism”. *Trend in neurosciences*, 12(7): 240-248.

Crutchfield, James. 1994. “Is anything ever new?: Considering emergence”. En: G. Cowan, D. Pines y P. Melzner (comps.), *Integrative themes*. Reading, Addison-Wesley.

- 2003. “Complex systems theory?”. *Santa Fe Institute Retreat*, Bishop’s Lodge, 24 y 25 de octubre.

Cvitanović, Predrag, Roberto Artuso, Per Dahlqvist, Ronnie Mainieri, Gregor Tanner, Gábor Vattay, Niall Whelan, Andreas Wirzba. 2002. *Classical and quantum chaos*. http://www.nbi.dj/chaosbook.

D’Andrade, Roy. 1995. *The development of cognitive anthropology*. Cambridge, Cambridge University Press.

Davis, Lawrence (comp.) 1987. *Genetic algorithms and simulated annealing*. Londres, Pitman.

Dawkins, Richard. 1985. *El gen egoísta. Las bases biológicas de nuestra conducta*. Barcelona, Salvat.

- 1986. *The blind watchmaker*. Nueva York, W. W. Norton.

De Cola, Lee y Nina Sui-Ngan Lam. 1993. “Introduction to Fractals in Geography”. En: Nina Siu-Ngan Lam and Lee De Cola (comps.) *Fractals in Geography*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, pp. 3-22.

Dean, Jeffrey, George Gumerman, Joshua Epstein, Robert Axtell, Alan Swedlund y otros. 2000. “Understanding Anasazi culture through agent-based modeling”. En: Timothy Kohler y George Gumerman (comps.), *Dynamics in human and primate societies*. Oxford, Oxford University Press, pp. 179-205.

Degtiarev, Konstantin. 2000. “Systems analysis: Mathematical modeling and approach to structural complexity measure using polyhedral dynamics approach”. *Complexity International*, 7: 1-22.

DeLanda, Manuel. 2002. *Intensive science and virtual philosophy*. Londres y Nueva York, Continuum Books.

Deleuze, Gilles y Félix Guattari. 1991. *Qu’est-ce que la philosophie?*. París, Éditions du Minuit.

Denbigh, Kenneth y J. S. Denbigh. 1985. *Entropy in relation to incomplete knowledge*. Cambridge, Cambridge University Press.

Dennett, Daniel. 1993. “Review of F. Varela, E. Thompson and E. Rosch, *The Embodied Mind*”. *American Journal of Psychology*, 106: 121-126.

Dent, Eric. 1999. “Complexity Science: A worldview shift”. *Emergence*, 1(4): 5-19.

Devlin, Keith. 1997. *Goodbye, Descartes: The end of logic and the search for a new cosmology of the mind*. Nueva York, John Wiley & Sons.

Dewdney, Alexander Keewatin. 1985. "Computer Recreations". *Scientific American,* 252(8): 12-16.

Díaz, Diego y Damián Castro. 2002. "Pattern recognition applied to rock art". En: G. Burenhult (comp.), *Archaeological informatics: Pushing the envelope, CAA 2001*, BAR International Series 1016, Oxford, Archaeopress, pp. 463-467.

Dimitrov, Vladimir. 2000. "The power of complexity". http://www.hawkesbury.uws.edu.au/~dimitrov/power.htm

Dimitrov, Vladimir, Lesley Kuhn y Robert Woog (comps). 2002. *Complexity thinking: A catalyst for creativity*. Sydney, University of Western Sydney.

Ditto, William y Louis Pecora. 1993. "Mastering Chaos". *Scientific American*, Agosto, pp. 78-84.

Dooley, Kevin, Patti Hamilton, Mona Cherri, Bruce West y Paul Fischer. 1997. "Chaotic behavior in society: Adolescent childbearing in Texas, 1964-1990". En: R. Eve, S. Horsfall y M. Lee (comps.), *Op.cit.*, pp. 243-268.

Doran, Jim y Mike Palmer. 1995. "The EOS project: integrating two models of palaeolithic social change". En Nigel Gilbert y Rosaria Conte (comps.), *Artificial Societies*, Londres, UCL Press, pp. 103-125.

Dobuzinskis, Laurent. 2004. "Where is Morin's road to complexity going?". *World futures: the journal of general evolution*. 60(5-6): 433-455.

Dow, James. 1976. "System models of cultural ecology". *Social Science Information*, 15: 953-976.

Dresden, Max. 1992. "Chaos: A new scientific paradigm – or science by public relations?". *Physics Teacher*, 30(1): 10-14, 74-80.

Dreyfus, Hubert. 1972. *What computers can't do: A critique of artificial reason*. Nueva York, Harper and Row.

- 1993. *What computers still can't do*. Cambridge (Massachusetts), MIT Press.

D'Souza, Raissa y Norman Margolus. 1999. "A thermodynamically reversible generalization of Diffusion Limited Aggregation". *Physics Review*, E, 60 (19): 264-277.

Dupuy, Jean-Pierre. 1982. *Ordres et désordres. Enquête sur un nouveau paradigme*. París, Seuil.

- 2000. *The mechanisation of the mind. The history of cognitive sciences*. Princeton, Princeton University Press.

Eckman, Jean-Pierre. 1981. "Roads to turbulence in dissipative dynamical systems". *Review of modern physics*, 53: 643-654.

Eckman, Jean-Pierre, S. Oliffson Kamphorst y David Ruelle. 1987. "Recurrence plots of dynamical systems". *Europhysics Letters*, 4(9): 973-977.

Edelman, Gerald. 1987. *Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection*. Nueva York, Basic Books.

Edens, Bram. 2001. "Semigroups and symmetry: An investigacion of Prigogine's theories". Manuscrito inédito [Internet].

Eglash, Ron. 1995. "African influences in cybernetics". http://www.haussite.net/haus.0/SCRIPT/txt2001/01/-eglash.HTML

- 1997. "Bamana and divination: Recursion in ethnomathematics". *American Anthropologist*, 99(1): 112-122.

- 1999. *African fractals. Modern computing and indigenous design*. New Brunswick, Rutgers University Press.

- S/f. "Chaos, utopia, and apocalypse. Ideological readings of the nonlinear sciences" [Internet].

Eidelson, Roy. 1997. “Complex adaptive systems in the behavioral social sciences”. *Review of General Psychology*, 1(1): 42-71.

Elliott, Euel y L. Douglas Kiel. 1997. “Nonlinear dynamics, complexity, and public policy: Use, misuse, and applicability”. En: R. Eve, S. Horsfall y M. Lee (comps.), *Op.cit.*, pp. 64-78.

Emmeche, Claus. 1992. “Life as an abstract phenomenon: Is Artificial Life possible?”. En: F. Varela y Paul Bourgine (comps.), *Toward a practice of autonomous systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*. Cambridge (Massachusetts), The MIT Press, pp. 466-474.

- 1998. *Vida simulada en el ordenador: La ciencia naciente de la vida artificial*. Barcelona, Gedisa.

Epstein, Joshua. 1997. *Nonlinear Dynamics, Mathematical Biology, and Social Science*. The Santa Fe Institute, Addison-Wesley.

Epstein, Joshua y Robert Axtell. 1996. *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. The Brookings Institution Press, Washington, D. C. & The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Escobar, Arturo. 1994. “Welcome to Cyberia: Notes of the Anthropology of Cyberculture”. *Current Anthropology*, 35(3): 211-231.

Eve, Raymond. 1997. “Afterword: So where are we now? A final word. En: R. Eve, S. Horsfall y M. Lee (comps.), *Op.cit.*, pp. 269-280.

Eve, Raymond, Sara Horsfall y Mary E. Lee. 1997. *Chaos, complexity and sociology: Myths, models and theories*. Thousand Oaks, Sage.

Falconer, Kenneth. 1999. *Fractal geometry. Mathematical foundations and applications*. Chichester, John Wiley & Sons.

Fáth, Gábor y Miklos Sarvary. 2005a. “A renormalization group theory of cultural evolution”. *Physica A*, 348: 611-629.

- 2005b. “Cultural evolution in a population of heterogeneous agents”. *Lecture notes in economics and mathematical systems*, 30.

Fauré, Philippe y Henri Korn. 2001. “Is there chaos in the brain? I. Concepts of nonlinear dynamics and methods of investigation”. *Life Sciences* 324: 773-793.

Feigenbaun, Mitchell. 1978. “Quantitative universality for a class of nonlinear transformations”. *Journal of Statistical Physics*, 19: 25.52.

- 1981. “Universal behavior in nonlinear systems”. *Los Alamos Science*, 1: 4-27.

Feldman, Jerome y Dana Ballard. 1982 “Connectionist models and their properties”. *Cognitive Science*, 6: 205-254.

Ferry, Barbara. 2004. “Artificial Anasazi”. *Santa Fe Institute Bulletin*, 19(2).

Field, Michael y Martin Golubitsky. 1995. “Symmetric chaos: How and why”. *Notices of the AMS*, 42: 240-244.

- 1996. *Symmetry and chaos: A search for pattern in mathematics, art, and nature*. Oxford, Oxford University Press.

Fioretti, Guido. 1996. “A concept of complexity for the social sciences”. *Working Paper*, WP 96144, International Institute for Applied Systems Analysis.

Fischer, Hans Rudi, Arnold Retzer y Jochen Shweitzer (comps.). 1997. *El final de los grandes proyectos*. Barcelona, Gedisa.

Fischer, Michael. 2002. “Classification, symbolic representation and ritual: Information vs. meaning in cultural process”. Ponencia presentada en European Meeting on Cybernetics and Systems Research 2002, Universidad de Viena, http://eclectic.ss.uci.edu/~drwhite/EMCSR02papers/Fischer_EMCSR.pdf.

Fischer, Michael y Dwight Read. 1999. "Economics and Social Science Research Council Grant Proposal", Internet.

Fisher, Arthur. 1985. "Chaos: the ultimate asymmetry". *Mosaic.*16(1): 24-33.

Flache, Andreas. 1999. "Stylized solutions from environmental dilemmas in a cellular world". Trabajo presentado en *8th International Conference on Social Dilemmas*, Zichron-Yaakov, Israel, Julio.

Flake, Gary William. 1999. *The computational beauty of nature. Computer explorations of fractals, chaos, complex systems, and adaptation*. Cambridge (Massachusetts), The MIT Press.

Flannery, Kent. 1968. "Archaeological systems theory and early Mesoamerica". En: B. Meggers (comp.), *Anthropological archaeology in the Americas*, Washington DC, Anthropological Society of Washington, pp. 67-87.

- 1986. *Guila Naquitz: Archaic foraging and early agriculture in Oaxaca, Mexico*. Orlando, Academic Press.

Fleissner, Peter y Wolfgang Hofkirchner. 1997. "Actio non est reactio: An extension of the concept of causality towards phenomena of information". *World futures*, 49(3-4): 409-427.

Foerster, Heinz von. 1973 [1960]. "Cybernetics of cybernetics". En: K. Krippendorf (comp.), *Communication and control in society*. Nueva York, Gordon and Breach, pp. 5-8.

- 1991. "Sobre sistemas auto-organizadores y sus ambientes". En: M. Pakman (comp), *Op. cit.*, pp. 39-55.

- 1997. "Reflexiones cibernéticas". En: H. R. Fischer y otros (comps.), *Op. cit.*, pp. 128-135.

Fogel, Lawrence J., A. J. Owens y M. J. Walsh. 1966. *Artificial intelligence through simulated evolution*. Nueva York, John Wiley.

Foin, Theodore y William Davis. 1987. "Equilibrium and nonequilibrium in ecological anthropology: An evaluation of 'stability' in Maring ecosystems in New Guinea". *American Anthropologist*, 89: 9-30.

Fokas, Athanassios Spyridon. 1991. "Some remarks on integrability". *Nonlinear Science Today,* 1(3): 6-11.

Forsé, Michel. 1986. *L'Ordre improbable, entropie et processus sociaux*. París, Universidad René Descartes.

Franklin, Stan. 1997. *Artificial Minds*. Cambridge (Massachusetts), MIT Press.

Freeman, James y David Skapura. 1991. *Neural networks: Algorithms, applications, and programming techniques*. Reading, Addison Wesley.

Friedman, Jonathan. 1974. "Marxism, structuralism, and vulgar materialism". *Man*, n.s., 9: 444-469.

Fuller, Buckminster y E. J. Applewhite. 1975. *Synergetics. Explorations in the geometry of thinking*. Londres, Macmillan.

Gallardo, Milton Hermes. 1997. "Determinismo estructural: ¿Teoría científica o dogma?". *Revista Chilena de Historia Natural*, 70: 315-319.

Ganguly, Niloy, Biplab Sikdar, Andreas Deutsch, Geoffrey Canright y Pal Chaudhuri. 2001. "A survey of cellular automata". BISON Project, http://www.cs.unibo.it/bison/publications/CAsurvey.pdf

Gardner, Howard. 1987. *La nueva ciencia de la mente. Historia de la revolución cognitiva*. Buenos Aires, Paidós.

Gardner, Martin. 1970. "Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'Life'". *Scientific American*, 223(4): 120-123.

- 1978. "Música blanca y música parda, curvas fractales y fluctuaciones del tipo 1/f". *Investigación y ciencia*, junio, 21: 104-113.

- 1988. *La ciencia: Lo bueno, lo malo y lo falso*. Madrid, Alianza.

Geertz, Clifford. 1963. *Agricultural involution: The process of ecological change in Indonesia*. Berkeley, University of California Press.

- 1996. “Géneros confusos: La refiguración del pensamiento social”. En: Carlos Reynoso (comp.), *El surgimiento de la antropología posmoderna*. 3ª edición, Barcelona, Gedisa, pp. 63-77.

Gell-Mann, Murray. 1994. *The Quark and the Jaguar*. Nueva York, Freeman [Traducción española: *El Quark y el Jaguar. Aventuras en lo simple y lo complejo*. 4ª edición, Barcelona, Tusquets, 2003].

- 1995. “What is complexity?”. *Complexity*, 1(1): 16-19. http://www.santafe.edu/sfi/people/mgm/complexity.html.

George, F. H. 1969. “Los autómatas finitos y el sistema nervioso”. En: N. Wiener y J. P. Schadé (comps.), *Op. cit*., pp. 59-80.

Gerdes, Paulus. 1995. *Une tradition geometrique en Afrique: les dessins sur le sable*. París, Harmattan.

- 1999. *Geometry from Africa*. Washington, Mathematical Association of America.

Gershenson, Carlos. 2001. *Artificial Societies of Intelligent Agents*. Tesis de licenciatura inédita. Fundación Arturo Rosenblueth, México.

- 2004. “Introduction to Random Boolean Betworks”. En M. Bedau, P. Husbands, T. Hutton, S. Kumar, y H. Suzuki (comps.) *Workshop and Tutorial Proceedings, Ninth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALife IX)*. pp. 160-173.

Gessler, Nicholas. 1994. “Artificial culture”. En: Rodney Brooks y Pattie Maes (comps), *Artificial Life IV: Proceedings of the Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems*. Cambridge (Massachusetts), MIT Press, pp. 430-435

Getz, Chonat. 1999. “Computer generation of geometric designs woven into the izimbenge using algorithmic processes developed in the field of fractal geometry”. *South African Journal of Science*, 95: 434-439, octubre.

Giacometti, K. 1981. “Terapia familiar: un modelo de desarrollo y una propuesta de clasificación”, *Terapia Familiar*, 7/8: 181-218.

Gilbert, Nigel. 1995. “Emergence in social simulation”. En: N. Gilbert y R. Conte (comps.), *Artificial societies*. Londres, UCL Press, pp. 144-156.

Glasersfeld, Ernst von. S/f. “Distinguishing the Observer: An attempt on interpreting Maturana”. http://www.-oikos.org/vonobserv.htm

- 1992. “Why I consider myself a Cybernetician”. *Cybernetics and Human Knowing*, *A journal of Second-Order Cybernetics and Cyber-Semiotics*, 1(2), http://www.flec.kvl.dk/sbr/Cyber/cybernetics/vol1/v1-1evg.htm.

Gleick, James. 1987. *Chaos. Making a new science*. Nueva York, Penguin Books.

Goffman, Erving. 1986 [1974]. *Frame analysis*. Boston, Northeastern University Press.

Goldberg, David E. 1989. *Genetic algorithms in search, optimization & machine learning*. Reading, Addison-Wesley.

Goodwin, Brian. 1998. *Las manchas del leopardo: La evolución de la complejidad*. Barcelona, Tusquets.

Grassé, Pierre-Paul. 1959. “La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes sp*. La théorie de la stigmergie: Essai d’interpretation des termites constructeurs”. *Insectes Sociaux,* 6: 41–83.

Graubard, Stephen (comp.). 1997. *El nuevo debate sobre la inteligencia artificial*. Barcelona, Gedisa [Traducción de Carlos Reynoso].

Grim, Patrick, Trina Kokalis, Ali Alai-Tafti, Nicholas Kilb. 2000. “Evolution of Communication with a Spatialized Genetic Algorithm”. *Technical report*, Department of Philosophy, SUNY at Stony Brooks.

Grinker, Roy (ed.) 1967. *Toward a unified theory of human behavior*, 2ª edición, NuevaYork, Basic Books.

Gross, Paul y Norman Levitt. 1994. *Higher superstition. The academic left and its quarrels with science*. Baltimore, The Johns Hopkins University Press.

Gross, Paul, Norman Levitt y Martin Lewis (comps.). 1996. *The flight from science and reason*. Nueva York, The New York Academy of Sciences.

Guattari, Félix. 1992. *Chaosmose: un nouvel paradigme esthétique*. París, Galilée.

Gumerman, George, Alan Swedlund, Jeffrey Dean y Joshua Epstein. 2002. "The evolution of social behavior in the prehistoric American southwest". *Santa Fe Institute Working Papers*, 02-12-067.

Gustafson, Karl. "Professor Ilya Prigogine: A personal and scientifics remembrance". *Mind and Matter*, 1(1): 9-13.

Hackworth, Tim. 1999. "India and Pakistan, a classic 'Richardson' arms race: A genetic algorithm approach". En: Wolfang Banzhaf y otros (comps.), *Op. cit.*, pp. 1543-1550.

Haken, Hermann. 1986. *Fórmulas del éxito en la naturaleza. Sinergética: la doctrina de la acción de conjunto*. Barcelona, Salvat.

Hall, Nina (comp.). 1991. *The New Scientist guide to Chaos*. Londres, Penguin Books.

Halperin, Jorge. 1992. "No hay nada fuera de la mente: Diálogo con Humberto Maturana, un notable biólogo cibernetista, sobre la realidad y el conocimiento". *Clarín*, domingo 28 de junio.

Haraway, Donna. 1995. *Ciencia, cyborgs y mujeres*. Madrid, Cátedra.

Harvey, David L. y Michael Reed. 1997. "Social science as the study of complex systems". En: L. D. Kiel y E. Elliott (comps.), *Op. cit.*, pp. 295-323.

Haupt, Randy y Sue Ellen Haupt. 2004. *Practical genetic algorithms*. 2ª edición, Hoboken, Wiley Interscience.

Hatcher, Melanie y Chris Tofts. 2004. "Reductionism isn't functional". *Hewlett-Packard Technical Reports*, HPL-2004-222.

Hayles, Katherine. 1990. *Chaos bound. Orderly disorder in contemporary literature and science*. Cornell University Press. [Traducción española: *La evolución del caos*. Barcelona, Gedisa, 1993].

- 1995. "Making the Cut: The Interplay of Narrative and System: Or, What Systems Theory Can't See". *Cultural Critique*, 30: 71-100.

- 1999. *How we became post-human: Virtual bodies in cybernetics, literature and informatics*. Chicago, University of Chicago Press.

Hebb, Donald. 1949. *The organization of behavior*. Nueva York, Wiley.

- 1960. "The American Revolution". *The American Psychologist*, 15: 735-745.

Hegselmann, Rainer. 1996. "Cellular Automata in the social sciences – perspectives, restrictions and artifacts". En: R. Hegselmann, Ulrich Mueller y Klaus Troitzsch (comps.), *Modeling and simulating in the social sciences from a Philosophy of Science point of view*. Dordrecht, Kluwer, pp. 209-237.

- 1998. "Modeling social dynamics by cellular automata". En: Wim Liebrand, Andrzej Nowak y R. Hegselmann (comps.), *Computer modeling of social processes*. Londres, Sage, pp. 37-64.

Helmreich, Stefan. 2001. "After culture: Reflections on the apparition of Anthropology in Artificial Life, a science of simulation". *Cultural Anthropology*, 16(4): 612-627.

Hemelrijk, Charlotte. 1999. "An individual-oriented model of the emergence of despotic and egalitarian societies". *Proceedings of the Royal Society of London*, 266: 361-369.

Hertz, John, Anders Krogh y Richard Palmer. 1991. *Introduction to the theory of neural computation*. Cambridge, Westview Press.

Heylighen, Francis. 1993. "Relation to other disciplines". *Principia Cybernetica*. http://pespmc1.vub.ac.be/-CYBSREL.html.

Hilborn, Robert. 2000. *Chaos and nonlinear systems. An introductions for scientists and engineers*. 2ª edición, Oxford, Oxford University Press.

Hill, James. 1970. "Systems theory and the explanation of change" [Mimeo].

Hofstadter, Douglas. 1992 [1979]. *Gödel, Escher, Bach: Un eterno y grácil bucle*. 4ª edición, Barcelona, Tusquets.

Holland, John. 1992a. "Genetic algorithms". *Scientific American*, julio, 267(1): 44-50.

- 1992b [1975]. *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge (Massachusetts), The MIT Press.
- 1995. *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Cambridge (Massachusetts), Perseus Books.
- 1998. *Emergence: From chaos to order*. Cambridge (Massachusetts), Perseus Books.

Holland, John, Keith Holyoak, Richard Nisbett y Paul Thagard. 1989. *Induction: Processes of inference, learning, and discovery*. Cambridge (Massachusetts), The MIT Press.

Hopcroft, John, Rajeev Molwani y Jeffredy Ullman. 2001. *Introduction to automata theory, languages and computation*. 2ª edición, Addison-Wesley.

Horgan, John. 1995. "From complexity to perplexity". *Scientific American*, Mayo, 272: 74-79.

- 1996. *The end of science*. Londres, Little, Brown and Company.
- 2001. *La mente por descubrir*. Barcelona, Paidós.

Huberman, Bernardo (comp.). 1988. *The ecology of computation*. Amsterdam, Elsevier.

Huneeus, Francisco y Sandra Isella. 1996. "Los orígenes psicológicos de la maldad grupal en las FF. AA. Y de orden: Necesidad de una continua revisión". http://www.campogrupal.com/maldad.html.

Ibáñez, Jesús. 1985. *Del algoritmo al sujeto*, Madrid, Siglo XXI.

Ibáñez, Jesús (comp.). 1990. *Nuevos avances en la investigación social. La investigación social de segundo orden*. Barcelona, Anthropos.

Iberall, Arthur. 1972. *Towards a general science of viable systems*. Nueva York, McGraw-Hill.

Jakobson, Roman. 1984 [1960]. "Lingüística y poética". En: *Ensayos de Lingüística General*. Barcelona, Ariel, pp. 347-395.

Jantsch, Erich. 1980. *The Self-Organizing Universe: Scientific and Human Implications of the Emerging Paradigm of Evolution*. Nueva York, Pergamon Press.

Johnson, David K. 1991. "Reclaiming reality: a critique of Maturana's ontology of the observer", *Methodologia*, 5(9): 7-31.

- 1993. "The metaphysics of constructivism". *Cybernetics and Human Knowing*, 1(4): 27-41.

Johnson, Jonathan y Brian Burton. 1994. "Chaos and complexity theory for management: Caveat emptor". *Journal of Management Enquiry*, 3(4): 320-328.

Johnson, Steven 2003. *Sistemas emergentes. O qué tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software*. Madrid, Turner / México, Fondo de Cultura Económica.

Juez, Fernando Martín. 2002. *Contribuciones para una antropología del diseño*. Barcelona, Gedisa.

Kadanoff, Leo. 1983. "Roads to chaos". *Physics Today*, diciembre, 36: 46-53.

- 1986. "Fractals: Where is the physics?". *Physics Today*, febrero, 39: 6-7.

- 1999. *From order to chaos II: Essays: Critical, chaotic and otherwise*. Nueva York, World Scientific Publishing Company.

Kamminga, Harmke. 1990. "What is this thing called chaos?". *New Left Review*, 181: 49-59.

Kampis, George y Vili Csanyi. 1985. "Autogenesis: the evolution of replicative systems". *Journal of Theoretical Biology*, 21 de mayo, 114(2): 303-21.

Kaplan, Craig. 2000. "Computer generated Star Islamic patterns". http://www.cgl.uwaterloo.ca/~csk/washington/taprats/bridges2000.pdf.

Karakostas, Vassilios. 1996. "On the Brussels School's Arrow of Time in Quantum Theory" *Philosophy of Science*, 63: 374-400.

Kasner, Edward y James Newman. 1985 [1967]. *Matemáticas e imaginación*. Madrid, Hyspamérica.

Kauffman, Stuart. 1991. "Antichaos and adaptation". *Scientific American*, 265(2): 64-70.

- 1993. *Origins or order: Self organization and selection in evolution*. Oxford, Oxford University Press.

- 1995. *At home in the universe: The search for laws of self-organization and complexity*. Oxford, Oxford University Press.

- 2000. *Investigations*. Oxford, Oxford University Press.

Keenan, Donald C. y Mike J. O'Brien. 1993. "Competition, collusion, and chaos". *Journal of Economic Dynamics and Control*, 17: 327-353.

Keizer, Joel. 1987. *Statistical Thermodynamics of Nonequilibrium Processes*. Berlín, Springer-Verlag.

Keizer, Joel y Ronald Forrest Fox. 1974. "Qualms regarding the range of validity of the Glansdorff-Prigogine criteron for stability on non-equilibrium states". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 71(1): 192-196.

Kenny, Vincent. 1992. "On the subject of autopoiesis and its boundaries: Does the subject matter?". *International Journal of General Systems*, 21(2), http://www.oikos.org/autopoiesis.htm.

Kiel, L. Douglas y Euel Elliott (comps.). 1997. *Chaos theory in the social sciences. Foundations and applications*. Ann Arbor, The University of Michigan Press.

King, Michael. 2001. "The construction and demolition of the Luhmann heresy". En: Jiri Priban y David Nelken (comps.), *Law's new boundaries: The consequences of legal autopoiesis*. Brookfield, Ashgate Pub. Co.

Kirchkamp, Oliver. 1994. *Spatial evolution of automata in the prisoner's dilemma*. Bonn, Bonn Universitty (mecanografiado).

Kirkpatrick, Scott, Charles Gelatt Jr. y Mario Vecchi. 1983. "Optimization by simulated annealing". *Science*, 220(4598): 671-680.

Klejn, Leo. 1973. "Marxism, the systemic approach, and archaeology". En: Colin Renfrew (comp.), *Op. cit.*, pp. 691-710.

Klir, George. 1984. "Teoría polifónica general de sistemas". En: G. Klir (comp.), *Tendencias en la teoría general de sistemas*, Madrid, Alianza, 3a. edición, pp. 9-28.

- 1993. "System science: A guided tour". *Journal of Biological Systems*, 1(1): 27-58.

Klüver, Jürgen y Jörn Schmidt. 1999. "Topology, metric and dynamics of social systems". *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2(3).

Koertge, Noretta (comp.). 1998. *A house built on sand. Exposing postmodernist myths about science*. Nueva York, Oxford University Press.

Kohler, Timothy, Matthew Van Pelt y Lorene Yap. 1999. "Reciprocity and its limits: Considerations for a study of the Pre-Hispanic Pueblo world". *Santa Fe Institute Working Papers*, 1997-07-19.

Kolata, Gina Bari. 1977. "Catastrophe theory: The emperor has no clothes". *Science*, 15 de abril. Correspondencia del 17 de junio y 26 de agosto.

Kolmogorov, Andrei. 1968. *Teoría de la poesía* [en ruso]. Moscú, Nauka.

Korshunov, Y. M. s/f. *Fundamentos matemáticos de la cibernética*, Moscú, Mir.

Koschmann, Timothy. 1996. "Of Hubert Dreyfus and dead horses: Some thoughts on Dreyfus' *What Computers Still Can't Do*". *Artificial Intelligence*, 80: 129-141.

Kosko, Bart. 1995. *Pensamiento borroso. La nueva ciencia de la lógica borrosa*. Barcelona, Grijalbo Mondadori.

Koza, John. 1992. *Genetic programming: On the programming of computers by natural selection*. Cambridge (Massachusetts), The MIT Press.

Kubik, Ales. 2003. "Toward a formalization of emergence". *Artificial Life*, 9(1): 41-65.

Kuper, Adam. 2000. "If memes are the answer, what is the question?". En: R. Aunger (comp.), *Op. cit*., pp. 175-188.

Kurzweil, Ray. 1999. *The age of spiritual machines*. Nueva York, Viking Penguin.

Langton, Chris. 1991. "Computation at the edge of chaos: Phase transitions and emergent computation". En: Stephanie Forrest (comp.), *Emergent computation: Self-organizing, collective, and cooperative phenomena in natural and artificial computing networks*, Cambridge (Massachusetts), MIT Press, pp. 12-37.

Langton, Chris (comp.). 1997. *Artificial Life: An overview*. Cambridge (Massachusetts), MIT Press.

Lansing, J. Stephen. 2000. "Foucault and the water temples: A reply to Helmreich". *Critique of Anthropology*, 20(3): 337-346.

- 2002. "'Artificial societies' and the social sciences". *Artificial Life*, 8: 279-292.
- 2003. "Complex adaptive systems". *Annual Review of Anthropology*, 32: 183-204.

Lansing, J. Stephen y James N. Kremer. 1993. "Emergent Properties of Balinese Water Temple Networks: Coadaptation on a Rugged Fitness Landscape". *American Anthropologist* 95(1): 97-114.

Laszlo, Ervin. 1969. "Systems and structures. Toward bio-social anthropology". En: R. D. Jones (comp.), *Unity through diversity*: *Essays in honor of Ludwig von Bertalanffy*, Nueva York, George Braziller.

- 1972. *The systems view of the world*, Nueva York, George Braziller.
- 1997. *El cosmos creativo. Hacia una ciencia unificada de la materia, la vida y la mente*. Barcelona, Kairós.

Laxton, Robert y William Cavanagh. 1995. "The Rank-Size Dimension and the History of Site Structure for Survey Data". *Journal of Quantitative Anthropology* 5: 327-358.

Layton, Robert. 2003. "Agency, structuration, and complexity". En: A. Bentley y H. Maschner (comps.), *Op. cit.*, pp. 103-110.

Leeds-Hurwitz, Wendy. 1991. "La búsqueda de estructuras: Gregory Bateson y la 'Historia Natural de una Entrevista'". En: Yves Winkin (comp.), *Op.cit*., pp.57-66.

Leiber, Theodor. 1998. "On the impact of deterministic chaos on modern science and philosophy of science: Implications for the philosophy of technology?". *Philosophy & Technology*, 4(2): 23-50.

Letelier, Juan Carlos, Gonzalo Marín, and Jorge Mpodozis. 2003. "Autopoietic and (M,R) systems". *Journal of Theoretical Biology*, 222: 261-272.

Lev, S., Grigori Leitus y Sariel Shalev. 2003. "Measurement of corrosion content of archaeological lead artifacts by their Meissner response in the superconducting state; a new dating method". *New Journal of Physics*, vol. 5, 99.1-99.9.

Lévi-Strauss, Claude. 1969 [1961]. *Arte, lenguaje y etnología. Entrevistas con Georges Charbonnier*. 2ª edición, México, Siglo XXI.

- 1973 [1958]. *Antropología estructural*. 5ª edición, Buenos Aires, Eudeba.

Levy, Robert y Roy Rappaport. 1982. "Gregory Bateson". *American Anthropologist*, 84: 379-394.

Lewin, Roger. 1992. *Complexity: Life at the edge of chaos*. Nueva York, Collier Books.

- 1999. *Complexity: Life at the edge of chaos*. 2ª edición, Chicago, The University of Chicago Press.

Li, Tien Yien y Allen Yorke. 1975. "Period Three Implies Chaos". *American Mathematical Monthly*, 82: 985-992

Lilienfeld, Robert. 1975. "Systems Theory as an Ideology". *Social Research*, 42(4-5): 637-660.

- 1978. *The rise of Systems Theory: An ideological analysis*. Nueva York, John Wiley and Sons.

Liljeros, Fredrik, Christopher Edling y Luis Nunez Amaral. 2003. "Sexual networks: Implications for the transmission of sexually transmitted infections". *Microbes and Infection*, 5: 189-196.

Lipset, David. 1980. *Gregory Bateson: The legacy of a scientist*. Englewood Cliffs, Prentice Hall.

López Aguilar, Fernando. 2001. "Antropología autorreflexiva. Apuntes sobre la historia y el devenir de la antropología mexicana". *Cuicuilco*, 8(21): 279-308.

Lorenz, Edward. 1978. "Quantitative universality for a class of nonlinear transformations". *Journal of Statistical Physics*, 19: 25-52.

- 1995. *La esencia del caos*. Madrid, Debate.

Lovelock, James E. 1985 [1975]. *Gaia:Una nueva visión de la vida sobre la tierra*. Madrid, Hyspamerica.

Luhmann, Niklas. 1982. *The differentiation of society*. Nueva York, Columbia University Press.

- 1990. *Sociedad y sistema*: *La ambición de la Teoría.* 2ª edición, Barcelona, Paidós.

- 1998 [1984]. *Sistemas sociales: Lineamientos para una teoría general*. Barcelona, Anthropos.

Luisi, Pier Luigi. 2003. "Autopoiesis: A review and reappraisal". *Naturwissenschaften*, 90(2): 49-59.

Lyotard, François. 1986. *La condición posmoderna*. 2ª edición, Madrid, Cátedra.

MacKay, David J. C. 2003. *Information theory, inference, and learning algorithms*. Cambridge, Cambridge University Press.

Mackenzie, Adrian. 2004. "The potential of the attractor: Non metaphorical transport between sciences and social theory". http://www.lancs.ac.uk/staff/mackenza/papers/non-metaphorical-complexity.pdf

Makse, Hernán, José Andrade, Michael Batty, Shlomo Havlin y Eugene Stanley. 1998. "Modeling urban growth patterns with correlated percolation". *ArXiv:Condmat* vol. 1, 30 de setiembre.

Malloy, Thomas, Carmen Bostic St. Clair y John Grinder. 2005. "Steps to an ecology of emergence". *Cybernetics and Human Knowing*, 11(4).

Manaris, Bill, Dallas Vaughan, Christopher Wagner, Juan Romero Cardalda, Robert Davis . 2003. "Evolutionary music and the Zipf-Mandelbrot law: Developing fitness functions for pleasant music". *Lecture Notes in Computer Science, Applications of evolutionary computing*, LNCS 2611, abril.

Mandelbrot, Benoît. 1983. *The fractal geometry of nature*. Nueva York, W. H. Freeman.

- 1988 [1975]. *Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión*. Barcelona, Tusquets.

- 1989. “Fractal geometry: What is it and what does it do?”. *Proceedings of the Royal Society of London*, 8 de mayo, pp. 3-16.

- 1999. “A Multifractal walk down Wall Street”. *Scientific American*, febrero, pp. 50-53.

- 2003. *La geometría fractal de la naturaleza*. 2ª edición, Barcelona, Tusquets.

Manson, Steven. 2001. “Simplifying complexity: a review of complexity theory”. *Geoforum*, 32(3): 405-414.

Marcus, Gary. 1998. “Rethinking eliminative connectionism”. *Cognitive Psychology*, 37: 243-282.

Marcus, George (comp.). 1996. *Connected: Engagements with media*. Chicago, Chicago University Press.

Marks-Tawlor, Terry y Mario Martínez. 2001. “Francisco Varela (1946-2001)”. *Society for Chaos Theory in Psychology & Life Sciences*, 9(2): 3-5.

Martin, David. 1972. “Lenguajes formales y sus autómatas”. En: León Presser, Alfonso Cárdenas y Miguel Marin (comps.), *Ciencias de la Computación*, t. 2, México, Limusa-Wiley, pp. 113-167.

Martín, Miguel Angel, Manuel Morán y Miguel Reyes. 1998. *Iniciación al caos: Sistemas dinámicos*. Madrid, Síntesis.

Maruyama, Magoroh. 1968. “The Second Cybernetics: Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes”. En: Walter Buckely (comp.), *Op. cit.*, pp. 304-316.

- 1980. “Mindscapes and science theories”, *Current Anthropology*, 21(5): 589-608.

- 1988. [Sin título]. *This week’s citation classic*, N° 8, 22 de febrero, http://www.garfield.library.upenn.edu/-classics1988/A1988L962600001.pdf.

Marwan, Norbert. 2003. “Encounters with neighbors: Current developments of concepts based on recurrence plots and their applications”. Tesis doctoral, Instituto de Física, Facultad de Matemáticas y Ciencias Naturales, Universidad de Potsdam. http://pub.ub.uni-potsdam.de//volltexte/2005/89/.

Maschner, Herbert y Alexander Bentley. 2003. “The power-law of rank and household on the North Pacific”. En: A. Bentley y H. Maschner (comps.), *Op. cit*., pp. 47-60.

Mathews, K. Michael, Michael White y Rebecca Long. 1999. “Why study the complexity sciences in the social sciences?”. *Human Relations*, 52(4): 439-462.

Maturana, Humberto. 1975. “The organization of the living: a theory of the living organization”, *International Journal of Man-Machine Studies*, 7: 313-332, 457-469.

- 1990. “Response to Berman’s critique of *The Tree of Knowledge*”. *Journal of Humanistic Psychology* 31: 88-97.

- 1991. “Response to Jim Birch”. *Journal of Family Therapy*, 13(4): 375-393.

- 1995. “Todo lo dice un observador”. En W. I. Thompson (comp.), *Op. cit.*, pp. 63-79.

- 1996. *La realidad: ¿objetiva o construida?*. Barcelona, Anthropos.

- 2004. “Veinte años después”. Prefacio a la segunda edición de H. Maturana y F. Varela, *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: La organización de lo vivo*. Buenos Aires, Lumen, pp. 9-33.

Maturana, Humberto y Francisco Varela. 1973. *De máquinas y seres vivos*, Santiago, Editorial Universitaria. [6ª edición, Buenos Aires Lumen, 2004].

- 1978. “Cognition”. En: Peter Hejl, Wolfram Köck y Gerhard Roth (comps), *Wahrnehmung und Kommunikation*, Frankfurt, Peter Lang, pp. 29-49.

- 1980. *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*. Dordrecht, D. Reidel.

- 1987. *The tree of knowledge: The biological roots of human understanding*. Boston, New Science Library. [Traducción castellana: *El árbol del conocimiento: Las bases biológicas del entendimiento humano*. Buenos Aires, Lumen, 2003].

- 2004. *Desde la biología a la psicología*. 4ª edición, Buenos Aires, Lumen.

May, Robert. 1976. "Simple mathematical models with very complicated dynamics". *Nature*, 261: 459-467.

- 1987. "Chaos and the dynamics of biological populations". *Proceedings of the Royal Society of London*, 413(1844): 27-43.

McGlade, James. 2003. "The map is not the territory: complexity, complication, and representation". En: A. Bentley y H. Maschner (comps.), *Op. cit.*, pp. 111-119.

McMullin, Barry. 1997. "Computational autopoiesis: The original algorithm". *Santa Fe Institute Working Paper* 97-01-001.

- 2004. "30 years of computational autopoiesis". *Artificial Life*, 10(3), http://www.eeng.dcu.ie/~alife/bmcm-alj-2004/html-single/#zeleny

McMullin, Barry y Francisco Varela. 1997. "Rediscovering computational autopoiesis". En: P. Husbands e I. Harvey (comps.), *Fourth European Conference on Artificial Life*. Cambridge (Massachusetts), MIT Press, pp. 38-47. Trabajo presentado en *ECAL-97*, Brighton, http://www.eeng.dcu.ie/~alife/bmcm-ecal97.

Mead, George Herbert. 1932. *The philosophy of the present*. Chicago, Open Court.

Melero, F. J., J. C. Torres y A. León. 2003. "On interactive 3D reconstruction of Iberian vessels". *4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage.*

Mendes, J. F. F. y Sergei Dorogovtsev. 2003. *Evolution of networks: From biological nets to the Internet and WWW*. Oxford, Oxford University Press.

Merry, Ury. 1995. *Coping with uncertainty: Insight from the new science of chaos, self-organization, and complexity*. Westport, Praeger Publishers.

Messick, David M. y Win B. G. Liebrand. 1995. "Individual heuristics and the dynamics of cooperation in large groups". *Psychological Review*, 102: 131-145.

Mier, Raymundo. 2002. "Complejidad: bosquejos para una antropología de la inestabilidad". En: Rafael Pérez-Taylor (comp.) *Antropología y complejidad*. Barcelona, Gedisa, pp. 77-104.

Mikulecky, Don. 1995. "Life, complexity and the edge of chaos: Cognitive aspects of communication between cells and other components of living systems". http://views.vcu.edu/~mikuleck/rev.htm.

- 1999. "Definition of complexity". http://views.vcu.edu/~mikuleck/ON%20COMPLEXITY.html.

Miller, Beatrice. 1972. "General systems theory: An approach to the study of complex societies". En: B. C. Agrawal (comp.), *Anthropological approaches to the study of a complex society*, Nueva Delhi, Indian Academy of Sciences, pp. 17-35.

Miller, James Grier. 1978. *Living systems*, NuevaYork, McGraw-Hill.

Mingers, John. 1990. "The Philosophical Implications of Maturana's Cognitive Theories". *Systems Practice*, 3(6): 569-584.

- 1994. *Self-Producing Systems: Implications and Applications of Autopoiesis***.** Nueva York, Plenum Publishing.

Minsky, Marvin y Seymour Papert. 1969. *Perceptrons: An introduction to computational symmetry*. Cambridge (Massachusetts), The MIT Press.

Miranda, Eduardo Reck. 2003. "On Making Music with Artificial Life Models", trabajo presentado en *5th Consciousness Reframed Conference*, University of Wales College, Gales.

Miranda, Eduardo Reck y Peter M. Todd. 2003. "A-Life and Musical Composition: A Brief Survey". *Proceedings of IX Brazilian Symposium on Computer Music: Music as Emergent Behaviour*, UNICAMP, Campinas, pp. 59-65.

Mitchell, Melanie. 1998. “Computation in cellular automata: A selected review”. En: T. Gramss, S. Bornholdt, M. Gross, M. Mitchell y T. Pellizzari (comps.), *Nonstandard computation*. Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft, pp. 95-140.

- 1999. *An introduction to genetic algorithms*. 5ª impresión, Cambridge (Massachusetts), The MIT Press.

Mitchell, Melanie, James Crutchfield y Peter Hraber. 1993. “Revisiting the edge of chaos: Evolving cellular automata to perform computations”. *SFI Working Papers,* 93-03-314.

Moles, Abraham. 1978. *Sociodinámica de la cultura*, Buenos Aires, Paidós.

Monod, Jacques. 1985 [1970]. *El azar y la necesidad*. Buenos Aires, Hispamérica.

Monroy Olivares, César. 2002. *Curvas fractales*. México, Alfaomega.

Morales, Joseph. 1998. “The definition of life”. *Psychozoan. A Journal of Culture*, 1(2). http://baharna.-com/philos/life.htm.

Morin, Edgar. 1974. “Le complexe d’Adam et l’Adam complexe”. En: E. Morin y M. Piattelli-Palmarini (comps.), *Op. cit.*, vol. 3, pp. 271-185.

- 1984 [1982]. *Ciencia con consciencia*. Barcelona, Anthropos.

- 1988 [1986]. *El Método. III. El conocimiento del conocimiento. Libro Primero: Antropología del conocimiento*. Madrid, Cátedra

- 1998 [1980]. *El método. II. La vida de la vida*. 4ª edición, Madrid, Cátedra.

- 1999 [1977]. *El método. I. La naturaleza de la naturaleza*. 5ª edición, Madrid, Cátedra.

- 2003 [1990]. *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona, Gedisa.

Morin, Edgar, Massimo Piattelli-Palmarini y otros. 1974a. *L’Unité de l’homme*. Vol. 2: *Le cerveau humain*. París, Éditions du Seuil.

- 1974b. *L’Unité de l’homme. Vol. 3: Pour une anthropologie fondamentale*. París, Éditions du Seuil.

Morrison, Foster. 1988. “On chaos”. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 69(25): 668-9.

Morse, Mary. 1995. *Women changing science: Voices from a field in transition*. Nueva York, Insight Books/ Plenum Press.

Mühlenbein, Heinz. 2004. “Towards a theory of organisms and evolving automata: Open problems and ways to explore”. En: Anil Menon (comp.), *Frontiers of evolutionary computation*, Nueva York, Kluwer Academic Publishers, pp. 1-36.

Murray, Harold James Ruthven. 1952. *A History of Board-Games Other Than Chess*, Oxford, Oxford University Press.

Murray, James D. 1991. “Mathematics—biology—nonlinearity”. *Nonlinear Science Today* 1(3): 1-5.

Nadel, Siegfried. 1953. “Social control and self-regulation”. *Social Forces*, 31: 265-273.

- 1957. *The theory of social structure*. Nueva York, Free Press of Glencoe [trad. esp.: *Teoría de la estructura social*, Madrid, Guadarrama, 1966].

Nagel, Ernest. 1981 [1961]. *La estructura de la ciencia*. Barcelona, Paidós.

Needham, Rodney. 1975. “Polythetic classification: Convergence and consequences”, *Man*, n.s., 10: 349-369.

Neumann, John von. 1956. “The general and logical theory of Automata”. En: James Newman (comp.), *The world of mathematics*, Nueva York , Simon and Schuster, vol. 4, pp. 2070-2098.

- 1966. *Theory of self-reproducing automata*. Urbana, University of Illinois Press.

Nespolo, Roberto. 2003. “Evolución por selección natural: Más evidencias que nunca”. *Revista Chilena de Historia Natural*, 76(4): 699-716.

Nicolis, Grégoire e Ilya Prigogine. 1989. *Exploring complexity. An introduction*. Nueva York, W. H. Freeman and Company.

Norman, Donald A. 1986. "Reflections on cognition and parallel distributed processing". En: D. E. Rumelhart y J. L. McClelland (Eds.), *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition, Vol. 2: Psychological and biological models.* Cambridge (Massachusetts), MIT Press, pp. 531-546).

Nowak, Andrzej, Jacek Szamrej, Bibb Latané. 1990. "From private attitude to public opinion – Dynamic theory of social impact". *Psychological Review*, 97: 362-376.

Nowak, Martin y Robert May. 1992. "Evolutionary games and spatial chaos". *Nature*, 359: 826-829.

- 1993. "The spatial dilemmas of evolution". *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 3: 35-78.

Obcemea, Ch. y E. Brändas 1983. "Analysis of Prigogine's Theory of Subdynamics". *Annals of Physics,* 147.

O'Hara, Maureen. 1995. "Is it time for clinical psychology to deconstruct constructivism?". *Journal of Constructivist Psychology*, 8(4): 299-303.

- 1999. "Of myths and monkeys: A critical look a critical mass". *Virtual Pomegranate*, vol. 10, http://chass.-colostate-pueblo.edu/natrel/pom/old/POM10a3.html

Orta, Andrew. "The Promise of Particularism and the Theology of Culture: Limits and Lessons of 'Neo-Boasianism'". *American Anthropologist*, 106(3): 473-487.

O'Sullivan, David y Mordechay Haklay. 2000. "Agent-based models and individualism: Is the world agent-based?". *Environment and Planning A*, 32(8): 1409-1425.

O'Sullivan, David y Paul Torrens. 2000. "Cellular models of urban systems". UCL, *CASA Paper* 22.

Ott, Edward, Celso Grebogi y James Yorke. 1990. "Controlling chaos". *Physical Review Letters*, 64: 1196-1199.

Paczuski, Maya, Sergei Maslov y Per Bak. (1996). "Avalanche dynamics in evolution, growth, and depinning models". *Physical Review E* 53: 414–443.

Pagels, Heinz. 1982. *The cosmic code: Quantum physics as the language of nature*. Nueva York, Simon & Schuster.

- 1991. *Los sueños de la razón. El ordenador y los nuevos horizontes de las ciencias de la complejidad*. Barcelona, Gedisa.

Pakman, Marcelo (comp.) 1991. *Las semillas de la cibernética. Obras escogidas de Heinz von Foerster*. Barcelona, Gedisa.

Palmer, Kent. 1998. "Autopoietic meta-theory", http://dialog.net:85/homepage/at00v00.pdf.

Panati, Charles. 1976. "Catastrophe theory". *Newsweek*, 19 de enero, pp. 54-55.

Pangaro, Paul. 2000. "Shoulders of a giant", http://www.pangaro.com/published/hvf-fest.html.

Panofsky, Erwin. 1980 [1962]. *Estudios sobre iconología*. 4ª edición, Madrid, Alianza.

Papert, Seymour. 1968. "The artificial intelligence of Hubert L. Dreyfus: a budget of fallacies", Cambridge (Massachusetts), *MIT AI Memo* N° 154. ftp://publications.ai.mit.edu/ai-publications/pdf/AIM-154.pdf.

Pask, Gordon. 1975. *The cybernetics of human learning and performance*. Londres, Hutchinson.

- 1993. "A systems research Festschrift". *Systems Research*, 10(3).

Pavao-Zuckerman, Mitchell. 2000. "The conceptual utility of models in human ecology". *Journal of Ecological Anthropology*, 4: 31-56.

Pawlak, Zdzisław. 1982. "Rough sets". *International Journal of Computer and Information Sciences*, 11: 341-356.

Pazos, Alejandro, A. Santos del Riego, Julián Dorado y Juan J. Romero Cardalda. 1999. "Adaptive aspects of rhythmic composition". En: Wolfgang Banzhaft y otros (comps.), *Op. cit.*, vol. 2, p. 1794.

Peak, David y Michael Frame. 1994. *Chaos under Control: The Art and Science of Complexity*. Nueva York, W. H. Freeman and Company.

Penrose, Roger. 1996 [1989]. *La mente nueva del emperador. En torno a la cibernética, la mente y las leyes de la física*. México, Fondo de Cultura Económica.

Pérez Soto, Carlos. 1994. "A propósito de la biología del conocimiento del profesor Humberto Maturana: Un diálogo inconcluso". http://sociologia.universidadarcis.cl/perez12.htm.

Peters, Edgar. 1994. *Fractal market analysis. Applying chaos theory to investment and economics*. Nueva York, Wiley.

Petitot-Cocorda, Jean. 1981. "Identidad y catástrofes (Topología de la diferencia)". En: Claude Lévi-Strauss (coordinador), *La Identidad*, Barcelona, Petrel, pp. 119-174.

- 1996. "Ni siquiera un ángel… (El problema del surgimiento de lo descriptible a partir de lo indescriptible)". En: Ilya Prigogine y otros, *Ilya Prigogine: El tiempo y el devenir. Coloquio de Cérisy*. Barcelona, Gedisa, pp. 333-344.

Phelan, Steven. 1999. "Note on the correspondence between complexity theory and systems theory". *Systemic Practice and Action Research*, 12(3): 237-238.

- s/f. "What is complexity science, really?. http://www.utdallas.edu/~sphelan/Papers/whatis.pdf.

Piaget, Jean. 1970. Presentación en el simposio "L'interdisciplinarité - Problèmes d'enseignement et de recherche dans les universités", Niza, 7 al 12 de setiembre.

Pickover, Clifford. 1986. "Biomorphs: Computer display of biological forms generated from mathematical feedback loops". *Computer Graphics Forum*, 5(4): 313-316.

- 1990. *Computers, pattern, chaos and beauty. Graphics from an unseen world*. Nueva York, St Martin's Press.

- s/f. "The 15 most famous transcendental numbers". http://sprott.physics.wisc.edu/pickover/trans.html.

Pinker, Steven. 1997. *How the mind works*. Nueva York, W. W. Norton.

Pinker, Steven y Alan Prince. 1988. "On language and connectionism: Analysis of a parallel distributed processing model of language acquisition". *Cognition*, 28: 73-193.

Pinson, Gérard, André Demailly y Daniel Favre. 1985. *La pensée. Approche holographique*. Lyon, Presses Universitaires de Lyon.

Pirrota, S. 1984. "Milan revisited: A comparison of the two Milan schools", *Journal of Strategic and Systemic Therapies*, 3(4): 3-15.

Plog, Fred T. 1975. "Systems theory in archaeological research", *Annual Review of Anthropology*, 4: 207-224.

Poincaré, Henri. 1909. *Science et méthode*. París, Flammarion.

Pollack, Jordan. 1988. "Connectionism: Past, present and future". *Artificial Intelligence Review,* 3: 3-20.

Pomian, Krzystof. 1978. "Catastrophes et déterminisme". *Libre*, 4: 115-136.

Pribram, Karl. 1997. "Holonomic brain theory and motor Gestalts: Recent experimental results". http://enabling.org/ia/gestalt/prib.html

Price, Bob. 1997. "The myth orf postmodern science". En: R. Eve, S. Horsfall y M. Lee (comps.), *Op.cit.*, pp. 3-14.

Price, Huw. 1997. *Time's Arrow and Archimedes' Point.* Oxford, Oxford University Press.

Prigogine, Ilya. 1961. *Introduction to thermodynamics of irreversible processes*. Nueva York, Wiley.

- 1977. "L'ordre par fluctuations et le systéme social". En: *L'idée de régulation dans les sciences*, Malojne-Doin, pp. l53-192.

- 1997. *¿Tan solo una ilusión? Una exploración del caos al orden*. 4ª edición, Barcelona, Tusquets.

- 1998. *El nacimiento del tiempo*. 3ª edición, Barcelona, Tusquets.

Prigogine, Ilya e Isabelle Stengers. 1983. *La nueva alianza. Metamorfosis de la Ciencia*, Madrid, Alianza.

- 1996. *La fin des certitudes: Temps, chaos et les lois de la nature*. París, Odile Jacob.

- 1998. *Entre el tiempo y la eternidad*. Buenos Aires, Alianza.

Provost, Wallace. 1985. "Contingency and complexity in the social theory of Niklas Luhmann". *International Journal of General Systems*, 11(4).

Pruecel, Robert y Ian Hodder. 1996. *Contemporary Archaeology in Theory: A Reader.* Oxford, Blackwell Publishers Ltd.

Prusinkiewicz, Przemyslav. 1986. "Score generation with L-systems". *Proceedings of the International Computer Music Conference '86*, pp 455–457.

Prusinkiewicz, Przemyslav y Jim Hanan. 1998. *Lindenmayer systems, fractals, and plants*. Nueva York, Springer-Verlag.

Prusinkiewicz, Przemyslav y Aristid Lindenmayer. 1990. *The algorithmic beauty of plants*. Nueva York, Springer Verlag.

Prusinkiewicz, Przemyslav, Kamala Krithivasan y M. G. Vijayanarayana. 1989. "Application of L-systems to algorithmic generation of South Indian folk art patterns and karnatic music". En: R. Narasimhan (comp.), *A perspective in theoretical computer science — commemorative volume for Gift Siromoney*, pp. 229–247. World Scientific, Singapur, 1989. Series in Computer Science, Vol. 16.

Rabagliatti, Andy. S/f. "Owari bead game". http://www.wizzy.com/owari.

Rapoport, Anatol. 1956. "The promise and pitfalls of information theory", *Behavioral Science*, 1: 303-315.

Rapoport, Anatol y William Horvath. 1959. "Thoughts on organization theory". *General Systems*, 4: 87-91.

Rapp, Paul. 1993. "Chaos in the neurosciences: cautionary tales from the frontier". *Biologist,* 40: 89-94.

- 1994. "A guide to dynamical analysis". *Integrative Physiological and Behavioral Science*, 29: 311-327.

Rappaport, Roy. 1967. "Ritual regulation of enviromental relations among a New Guinea people", *Ethnology*, 6: 17-30.

- 1968. *Pigs for the ancestors: Ritual in the ecology of a New Guinea people*, New Haven, Yale University Press. 2ª edición ampliada, 1984 [Traducción española de la 1ª edición: *Cerdos para los antepasados*, Madrid, Siglo XXI, 1987].

- 1971. "Ritual, sanctity, and cybernetics", *American Anthropologist*, 73(1): 59-76.

- 1975 (1956). "Naturaleza, cultura y antropología ecológica". En: Harry Shapiro (comp.), *Hombre, cultura y sociedad*, México, Fondo de Cultura Económica.

- 1979. *Ecology, Meaning, and Religion.* Berkeley, North Atlantic Books.

Rasband, S. Neil. 1990. "Asymptotic Sets and Bifurcations". §2.4 en *Chaotic dynamics of nonlinear systems*. Nueva York, Wiley, pp. 25-31.

Ray, Tapabrata y Kim Meow Liew. 2003. "Society and civilization: An optimization algorithm based on the simulation of social behavior". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 7(4): 386-396.

Rechenberg, Ingo. 1973. *Evolutionstrategie*. Stuttgart, Fromman-Holzboog.

Reeke, George y Gerald Edelman. 1993. “Cerebros reales e inteligencia artificial”. En: Stephen Graubard (comp.), *Op. cit.*, pp. 167-200.

Rees, D., G. Wilkinson y Clive Orton. 1991. “An investigation of the fractal properties of flint microwear images”. *Journal of Archaeological Science*, 18: 629-640.

Rees, D, G. Wilkinson, Clive Orton y Roger Grace. 1988. “Fractal analysis of digital images of flint microwear”. En: S. P. Q. Rahtz (compilador), *Computer and Quantitative Methods in Archaeology*, BAR International Series, 446(I): 177-183.

Regis, Ed. 1987. *¿Quién ocupó el despacho de Einstein?*. Barcelona, Anagrama.

Reichel-Dolmatoff, Gerardo. 1978. *El chamán y el jaguar*. México, Siglo XXI.

Reitman, Walter. 1965. *Cognition and thought, an information processing system*. Nueva York, Willey.

Renfrew, Colin (comp.). 1973. *The explanation of culture change. Models in prehistory*. Surrey, Duckworth.

Renfrew, Colin. 1978. “Trajectory discontinuity and morphogenesis: The importance of catastrophe theory for archaeology”. *American Antiquity*, 43: 203-222.

Renfrew, Colin, y Paul Bahn. 1996. *Archaeology: Theories, Methods, and Practice*, 2ª edición, Londres, Thames and Hudson.

Renfrew, Colin y Kenneth L. Cooke (comps.). 1979. *Transformations: Mathematical approaches to culture change*. Nueva York, Academic Press.

Rennard, Jean-Philippe. 2004. “Perspectives for strong Artificial Life”. En: L. De Castro y F. von Zuben (comps.), *Recent developments in biologically inspired computing*. Hershey, IGP, pp. 301-318.

Reynolds, Robert G. 1979. “An adaptive computer model for the evolution of plant collecting and early agriculture for hunter-gatherers in the valley of Oaxaca”. Tesis de doctorado inédita, Ann Arbor, Michigan University.

- 1986. “An adaptive computer model for the evolution of plant collecting and early agriculture in the eastern valley of Oaxaca”. En: Kent Flannery (comp.), *Guila Naquitz: Archaic foraging and early agriculture in Oaxaca, Mexico*. Nueva York, Academic Press, pp. 439-500.

- 1994a. “Introduction to Cultural Algorithms”. *Proceedings of the Third Annual Conference on Evolutionary Programming*, Anthony V. Sebald y Lawrence J. Fogel (comps.), Singapur, World Scientific Press, pp.131-139.

- 1994b. “Learning to Cooperate Using Cultural Algorithms”. En: Nigel Gilbert y J. Doran (comps.), *Simulating Societies*, Londres, University College of London Press, pp. 223-244.

- 1997. “Why Does Cultural Evolution Proceed at a Faster Rate Than Biological Evolution?”. En: Sander van der Leeuw y James McGlade (comps.), *Time, Process, and Structured Transformation in Archaeology*, Nueva York, Routledge, pp. 269-282.

- 1999a. “An Overview of Cultural Algorithms”, en *Advances in Evolutionary Computation*, McGraw Hill Press.

- 1999b. “The Impact of Raiding on Settlement Patterns in the Northern Valley of Oaxaca: An Approach Using Decision Trees Dynamics”. En: T. Kohler y G. Gumerman (comps.), *Human and Primate Societies: Agent-Based Modelling of Social and Spatial Processes*, Oxford, Oxford University Press.

Reynoso, Carlos. 1986a. “De la cibernécdoque a la sistemántica: Usos retóricos y rituales de la teoría sistémica en antropología*”*. Manuscrito. Segundo Congreso Argentino de Antropología Social.

- 1986b. *Teoría, historia y crítica de la antropología cognitiva*. Buenos Aires, Búsqueda.

- 1987. *Paradigmas y estrategias en antropología simbólica*. Buenos Aires, Búsqueda.

- 1988. “Sobre la antropología posmoderna”. *Revista de Occidente*, 82: 142-148.

- 1991. *El surgimiento de la antropología posmoderna*. Barcelona, Gedisa.

- 1993. *De Edipo a la máquina cognitiva*. Buenos Aires, El Cielo por Asalto.

- 2005. "The impact of Chaos and Complexity Theories on spatial analysis: Problems and perspectives". *Proceedings, 24th International Research Symposium, Reading Historical Spatial Information from Around the World: Studies of Culture and Civilization based on Geographic Information Systems Data*, Kyoto, International Research Center for Japanese Studies, pp. 81-89.

Reynoso, Carlos y Eduardo Jezierski. 2002. "A genetic programming problem solver for Archaeology". *Archaeological Informatics: Pushing the envelope*. CAA 2001, Visby, pp. 507-510.

Richards, Diana. 1997. "From individuals to groups: The aggregation of votes anc chaotic dynamics". En: L. Douglas Kiel y Euel Elliott (comps.), *Op. cit.*, pp. 89-116.

Riebling, Barbara. 1993. "Remodelling Truth, Power, and Society: Implications of Chaos Theory, Nonequilibrium Dynamics, and Systems Science for the Study of Politics and Literature". En: Nancy Easterlin y Barbara Riebling (comps.), *After Poststructuralism: Interdisciplinarity and Literary Theory,* Evanston, Northwestern University Press, pp.177-202.

Rodin, Miriam, Karen Michaelson y Gerald Britan. 1978. "Systems theory in anthropology", *Current Anthropology*, 19(4): 747-762.

Rodríguez Alcalde, Angel, Carmelo Alonso Jiménez y Julián Velázquez Cano. 1995. "Fractales para la arqueología: Un nuevo lenguaje". *Trabajos de Prehistoria*, 52(1): 13-24.

Romero Cardalda, Juan Jesús y Colin Johnson. 2002. "Genetic algorithm in visual art and music". *Leonardo*, 35(2): 175-184.

Rosen, Robert. 1980. "Comments on 'A unified theory of biology and physics' by S. Goldman". *Journal of Social and Biological Structures*, 3: 363-365.

- 1991. *Life itself*. Nueva York, Columbia University Press.

- 2000a. "Some Random Thoughts about Chaos and Some Chaotic Thoughts About 'Randomness'". En: *Essays on Life itself*. Nueva York, Columbia University Press, pp. 187-196.

- 2000b. *Essays on Life Itself*. Nueva York, Columbia University Press.

Rosenhead, Jonathan. 1976. "Prison 'Catastrophe'". *New Scientist*, 15 de julio, p. 140.

Ruelle, David. 1980. "Strange attractors". *Mathematical Intelligencer*, 2: 126-137.

- 1990. "Deterministic chaos: The science and the fiction". *Proceedings of the Royal Society of London*, A, 427: 241-248.

- 1991. *Chance and chaos*. Princeton, Princeton University Press [Traducción española: *Azar y Caos*. Madrid, Alianza, 2003].

- 1994. "Where can one hope to profitably apply the ideas of chaos?". *Physics Today*, 47(7): 24-30.

Ruelle, David y Floris Takens. 1971. "On the nature of turbulence". *Communications in mathematical physics*, 20: 167-192.

Rumelhart, David, Jay McClelland y PDP Research Group (comps.). 1986. *Parallel Distributed Processing*. Cambridge, MIT Press, 2 volúmenes.

Russell, Stuart y Peter Norvig. 2004. *Inteligencia Artificial. Un enfoque moderno*. 2ª edición, Madrid, Pearson/Prentice Hall.

Sahlins, Marshall. 1964. "Culture and environment: The study of cultural ecology". En: Sol Tax (comp.), *Horizons in anthropology*. Chicago, Aldine, pp. 132-147.

Sakoda, James. 1949. *Minidoka: An analysis of changing patterns of social interaction*. Tesis doctoral inédita, Universidad de California en Berkeley.

- 1971. “The checkerboard model of social interaction”. *Journal of Mathematical Sociology,* 1: 119-132.

Salam, Abdus. 1981. “Interview”. *The Illustrated Weekly of India*, febrero.

Sametband, Moisés José. 1999. *Entre el orden y el caos: La complejidad*. 2ª edición, México, Fondo de Cultura Económica.

Sanders, Leonard. 1996. “Dynamic models of urban systems”. En: M. Fischer, H. J. Scholten y D. Unwin (comps.), *Spatial analytical perspectives on GIS*. Londres, Taylor and Francis, pp. 229-244.

Saperstein, Alvin. 1984. “Chaos – A model for the outbreak of war”. *Nature*, 309: 303-305.

Sardar, Ziauddin y Jerome Ravetz. 1994. “Complexity: Fad or future?”. *Futures*, 26(6): 568-572.

Sarkar, Palash. 2000. “A Brief History of Cellular Automata”. *ACM Computing Systems*, 32(1): 80-107.

Šarkovskii, Alexander Nikolaievich. 1964. “Coexistencia de ciclos en una aplicación continua de una línea sobre sí misma” [en ruso], *Ukrainiskii Matematicheskii Zhurnal,* 16(1): 61-71.

Saunders, Peter T. 1983. *Una introducción a la teoría de catástrofes*. Madrid, Siglo XXI.

Schelling, Thomas. 1969. “Models of segregation”. *American Economic Review*, 59: 488-493.

- 1971. “Dynamic models of segregation”. *Journal of Mathematical Sociology*, 1: 143-186.

Schiffer, Michael. 1972 “Archaeological context and systemic context”. *American Antiquity*, 37: 156-165.

Schroeder, Manfred. 1991. *Fractals, chaos, power laws*. Nueva York, Freeman.

Schuster, Heinz Georg. 1984. *Deterministic chaos*. Weinheim, Physik-Verlag.

Scott, Stephen. 1991. “Clocks and chaos in chemistry”. En: N. Hall (comp.), *Op. cit.*, pp. 108-121.

Segarra, José Gabriel. 2001. *Vida artificial: Del caos al orden*. Alzira, Algar Editorial.

Sellers, Bill. 2001. “Using genetic algorithms to estimate the cost of homoid locomotion”. British Association of Biological Anthropology and Osteoarchaeology, 14 al 15 de julio, Universidad de Durham.

Senge, Peter. 1990. *The fifth discipline: The art & practice of the learning organization*. Nueva York, Currency Doubleday.

Sengel, Randall. 1979. “Further comments on systems theory in anthropology”, *Current Anthropology*, 20(4): 811-814.

Shalizi, Cosma. 2001a. “Ilya Prigogine”, Octubre, http://www.santafe.edu/~shalizi/notebooks/prigogine.html.

- 2001b. “Causal architecture, complexity and self-organization in time series and celular-automata”. Tesis doctoral, Universidad de Michigan, http://cscs.umich.edu/~crshalizi/thesis/single-spaced-thesis.pdf.

- 2002. “Cybernetics”. http://cscs.umich.edu/~crshalizi/notebooks/cybernetics.html.

Shannon, Claude. 1948. “A mathematical theory of communication”. *Bell System Technical Journal*, 37(7): 379-423 y 37(10): 623-656.

Shannon, Claude y John McCarthy (comps.) 1956. *Automata studies*, Princeton, Princeton University Press.

Shannon, Claude y Warren Weaver. 1949. *The mathematical theory of communication*. Urbana, University of Illinois Press.

Simon, Fritz B., Helm Stierlin y Lyman C. Wynne. 1988. *Vocabulario de terapia familiar*, Barcelona, Gedisa.

Simon, Herbert. 1987. “Giving the soft sciences a hard sell”. *Boston Globe*, 3 de mayo, A23.

Singh, Jagjit. 1979. *Teoría de la información, del lenguaje y de la cibernética*. Madrid, Alianza.

Siromoney, Gift, R. Siromoney y K. Krithivasan. 1974. “Array languages and kolam”. *Computer Graphics and Image Processing,* 3: 63-82.

Sklar, Lawrence. 1995. “The Elusive Object of Desire in Pursuit of the Kinetic Equations of the Second Law”. En: Steven Savitt (comp.), *Time’s arrow today*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 191-216.

Smith, Alfred G. (comp.). 1976-77 [1966]. *Comunicación y cultura*, Buenos Aires, Nueva Visión. I: La teoría de la comunicación humana. II: Sintáctica. III: Semántica y pragmática.

Smith, Alvin. 1984. “Plants, fractals and formal languages”. *Computer Graphics,* 18 (Julio): 1-10.

Smith, T. y K. A. De Jong. 1981. “Genetic algorithms applied to the callibration of information driven models of US migration patterns”. *Proceedings of the 12th Annual Pittsburgh Conference on Modelling and Simulation*, pp. 955-959.

Smoliar, Stephen. 1989. “Review of Gerald Edelman, Neural Darwinism: The theory of neuronal group selection”. *Artificial Intelligence*, 39: 121-139.

Sokal, Alan y Jean Bricmont. 1999. *Imposturas intelectuales*. Buenos Aires, Paidós.

Somenzi, Vittorio. 1987. “The Italian Operative School”. *Methodologia*, 1: 59-66.

Sornette, Didier. 2000. *Critical phenomena in natural sciences*. Berlín, Springer Verlag.

Speck, Ross y Carolyn Attneave. 1974. *Redes familiares*, Buenos Aires, Amorrortu.

Sperber, Dan. 1996. *Explaining culture: A naturalistic approach*. Oxford, Blackwell.

- 2000. “Why memes won’t do”. En: R. Aunger (comp.), *Op. cit.*, pp. 163-174.

Spire, Arnaud. 2000. *El pensamiento de Prigogine*. 2ª edición, Barcelona, Andrés Bello.

Sprott, Julien. 1993. *Strange attractors: Creating patterns in chaos*. Nueva York, Henry Holt.

Spurrett, David. 1999a. “Lyotard and the postmodern misunderstanding of physics”. *Theoria*, 93: 29-52.

- 1999b. “A review article”. *South African Journal of Philosophy*, 18(2). 258-274.

Srinivasan, N. 1998. “Science and mysticism”. *Indian Skeptic*, 1(8/3), http://www.indian-skeptic.org/html/-is_v01/1-8-3.htm

Steenburg, David. 1991. “Chaos at the marriage of heaven and hell”. *Harvard Theological Review*, 84: 447-466.

Stenger, Victor. 1995. *The unconscious quantum: Metaphysics in modern physics and cosmology*. Nueva York, Prometheus Books.

Stepp, John. 1999. “Perspectives for information ecology”. *Georgia Journal of Ecological Anthropology*, 3: 38-54.

Stevens, Stanley. 1957. “On the psychophysical law”. *Psychological Review*, 64: 153-181.

Strathern, Marilyn. 1992. *Partial connections*. Savage (Maryland), Rowan & Littlefield.

Strauss, Claudia y Naomi Quinn. 1997. *A cognitive theory of cultural meaning*. Cambridge, Cambridge University Press.

Strogatz, Steven. 1994. *Nonlinear dynamics and chaos. With applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Cambridge, Westview Press.

- 2003. *Sync: The emerging science of spontaneous order*. Nueva York, Hyperion Books.

Sussmann, Hector y Raphael Zahler. 1978. “Catastrophe theory as applied to the social and biological sciences: A critique”. *Synthése*, 37: 117-216.

Swenson, Rod. 1992. “Autocatakinetics, Yes-Autopoiesis, No: Steps Towards a Unified Theory of Evolutionary Ordering”. *International Journal of General Systems*, 21(2): 207-228.

Thom, René. 1968. “Une théorie dynamique de la morphogénèse”. En: C. H. Waddington (comp.), *Towards a theoretical biology*, Chicago, Aldine, pp. 152-179.

- 1980. “Halte au hasard, silence au bruit [et mort aux parasites]”. *Le Débat*, 3: 119-132.
- 1985. *Parábolas y catástrofes*. Barcelona, Tusquets.
- 1990. “Halte au hasard, silence au bruit”. En: *La querelle du déterminisme.* Paris, Gallimard, pp. 61-78.
- 1992. “Determinismo e innovación”. En: Jorge Wagensberg (comp.), *Op. cit.*, pp. 62-76.
- 1997 [1977]. *Estabilidad estructural y morfogénesis: Ensayo de una teoría general de modelos*. 2ª edición, Barcelona, Gedisa.

Thompson, Willard Irwin. 1995. *Gaia: Implicaciones de la nueva biología*. 3ª edición, Barcelona, Kairós.

Thrift, Nigel. 1999. “The place of complexity”. *Theory, Culture and Society*, 16(3): 31-69.

Tooby, John y Leda Cosmides. 1992. “The psychological foundations of culture”. En: J. H. Barkow, L. Cosmides y J. Tooby (comps.), *The adapted mind*. Nueva York, Oxford University Press.

Torrens, Paul. 2000. “How cellular models of urban systems work”. UCL, *CASA Paper*, 28.

Touretzky, David y Geoffrey Hinton. 1985. “Symbols among the neurons: Details of a connecionist inference architecture”. *Proceedings of the Ninth Annual Conference of the Cognitive Science Society*.

Troitzsch, Klaus G. 1996. “Chaotic behavior in social systems”. En: R. Hegselmann y H.-O. Peitgen (comps.), *Modelle Sozialer Dynamiken: Ordnung, Chaos und Komplexität*. Viena, Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, pp. 162-186.

Tuceryan, Mihran y Anil Jain. 1998. “Texture analysis”. En: C. Chen, L. Pau y P. Wang (comps.), *The Handbook of pattern recognition and computer vision*, 2ª edición, River Edge, World Scientific Publishing Co., pp. 207-248.

Tufillaro, Nicholas, Tyler Abbott y Jeremian Reilly. 1990. *An experimental approach to nonlinear dynamics and chaos*. Reading, Addison Wesley.

Turing, Alan. 1936. “On computable numbers with an application to the Eintscheidungsproblem”. *Proceedings of the London Mathematical Society*, serie 2, 42: 230-265 y 43: 544-546.

- 1950. “Computing machinery and intelligence”. *Mind*, 59(236): 433-460.
- 1952. “The Chemical Basis of Morphogenesis”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 237: 37-72.
- 1969 [1948]. “Intelligent machinery”. En: B. Maltzer y D. Michie (comps.), *Machine intelligence*, Edinburgo, Edinburgh University Press, National Physical Laboratory Report, vol. 5, pp. 3-23.

Turner, Frederick. 1997 “Foreword: Chaos and Social Science”. En: R. Eve, S. Horsfall y M. Lee (comps.), *Op. cit*., pp. xi-xxxii.

Urribarri, Fernando. 2003. “El sabor de Cerisy”. *Página/12*, 14 de setiembre, suplemento *Radar*, pp. 4-7.

Vandervert, Larry. 1995. “Chaos theory and the evolution of consciousness and mind: A thermodynamic-holographic resolution of the mind-body problem”. *New ideas in Psychology*, 13(2): 107-127.

Varela, Francisco. 1979. *Principles of Biological Autonomy*. Nueva York, Elsevier (North Holland).

- 1981a. “Autonomy and autopoiesis”. En: Gerhard Roth y Helmut Schwegler (comps.), *Self-Organizing systems: An interdisciplinary approach*. Frankfurt/Nueva York, Campus Verlag, pp. 14-23.
- 1981b. “Describing the logic of the living: The adequacy and limitations of the idea of autopoiesis”. En: Milan Zeleny (comp.), *Autopoiesis: A theory of living organization*. Nueva York, North Holland, pp. 36-48.
- 1989. “Reflections on the circulation of concepts between a biology of cognition and systemic family therapy”. *Family Process*, 28(1): 15-24.

- 1990. *Conocer. Las ciencias cognitivas: tendencias y perspectivas. Cartografía de las ideas actuales*. Barcelona, Gedisa.

- 1995. "Heinz von Foerster, the scientist, the man". *SEHR*, 4(2), http://www.stanford.edu/group/SHR/4-2/-text/varela.html.

- 2004. "Prefacio a la Segunda Edición". En: H. Maturana y F. Varela, *De máquinas y seres vivos*. Buenos Aires, Lumen, pp. 34-61.

Varela, Francisco, Humberto Maturana y Ricardo Uribe. 1974. "Autopoiesis: The Organization of Living Systems, Its Characterization and a Model". *Biosystems*, 5: 187-196. [Amsterdam: North-Holland].

Varela, Francisco, Evan Thomson y Eleanor Rosch. 1992. *De cuerpo presente. Las ciencias cognitivas y la experiencia humana*. Barcelona, Gedisa.

Vattimo, Gianni. 1997. "La reconstrucción de la racionalidad hermenéutica". En: H. R. Fischer y otros (comps.), *Op. cit*., pp. 57-70.

Vernadsky, Vladimir Ivanovich. 1997. *La biosfera*. Madrid, Fundación Argentaria.

Vayda, Andrew y B. J. McKay. 1975. "New directions in ecology and ecological anthropology", *Annual Review of Anthropology*, 4: 293-306.

Verstraeten, Guido. 1991. "Some Critical Remarks Concerning Prigogine's Conception of Temporal Irreversibility". *Philosophy of Science*, 58: 639-654.

Vicsek, Tamás. 2001. "A question of scale". *Nature*, 411: 421.

Vincent, Joan. 1986. "System and process, 1974-1985". *Annual Review of Anthropology*, 15: 99-119.

Voss, Richard F. y John Clarke. 1975. "1/f noise in music and speech". *Nature*, 258: 317-318.

- 1978. "1/f noise in music: Music from 1/f noise". *Journal of the Acoustical Society of America*, 63(1): 258-263.

Wagensberg, Jorge (comp.). 1992. *Proceso al azar*. 2ª edición, Barcelona, Tusquets.

Wagner, Roy. 1991. "The fractal person". En: Maurice Godelier y Marilyn Strathern (comps.), *Big men and great men. Personifications of power in Melanesia*. Cambridge, Cambridge University Press.

Waldrop, Mitchell. 1992. *Complexity: The emerging science at the edge of order and chaos*. Nueva York, Simon and Schuster.

Wang, Xiao Fan y Guanrong Chen. 2003. "Complex networks: Small-world, scale-free and beyond". *IEEE Systems and Circuits Magazine*, primer trimestre, pp. 6-20.

Washburn, Dorothy y Donald Crowe. 1988. *Symmetries of culture: Theory and practice of plane pattern analysis*. Seattle, University of Washington Press.

- (comps). 2004. *Symmetry comes of age: The role of pattern in culture*. Seattle, University of Washington Press.

Watts, Duncan. 2004. *Six degrees: The science of a connected age*. Londres, Vintage.

Watts, Duncan y Steven Strogatz. 1998. "Collective dynamics of 'small world' networks". *Nature*, 393: 440-442.

Watzlawick, Paul. 1994. *¿Es real la realidad? Confusión, desinformación, comunicación*. Barcelona, Herder.

Watzlawick, Paul, Janet Beavin y Don Jackson. 1981 [1967]. *Teoría de la comunicación humana*, Barcelona, Herder.

Watzlawick, Paul y otros. 1989. *La realidad inventada*. Barcelona, Gedisa.

Weaver, David S. 1980. "Catastrophe theory and human evolution", *Journal of Anthropological Research*, 36(4): 403-410.

Weaver, Warren. 1948. “Science and complexity”. *American Scientist*, 36: 536-644.

- 1968. “Las matemáticas de la comunicación”. En: R. Carnap, O. Morgenstern, N. Wiener y otros, *Matemáticas en las ciencias del comportamiento*. Madrid, Alianza, pp. 106-118.

Weinberg, Gerald M. 1975. *An introduction to general systems thinking*, Nueva York, Wiley-Interscience.

Weinberg, Gerald M. 1984. “Una aproximación por computadores a la teoría general de sistemas”. En: G. Klir (comp.), *Op.cit.*, pp. 118-167.

Weinberg, Steven. 2002. “Is the universe a computer?”. *New York Review of Books*, 49(16), 24 de octubre.

Widman, Lawrence, Kenneth Loparo y Norman Nielsen (comps.). 1989. *Artificial Inteligence, simulation, and modeling*. Nueva York, Wiley.

Wiener, Norbert. 1938. “The homogeneous Chaos”. *American Journal of Mathematics*, 60: 897-936.

- 1977. “Cibernética”. En: A. G. Smith (comp.), *Op.cit*., tomo I, pp. 47-61**;** también en R. Carnap y otros, 1968. *Matemáticas en las ciencias del comportamiento*. Madrid, Alianza, pp. 92-105.

- 1985 [1948, rev. 1961]. *Cibernética, o el control y comunicación en animales y máquinas*. Barcelona, Tusquets.

Wiener, Norbert y J. P. Schadé. 1969. “Introducción a la neurocibernética”. En: N. Wiener y J. P. Schadé (comps.), *Sobre los modelos de los nervios, el cerebro y la memoria*, Madrid, Tecnos, pp. 9-18.

Wiggins, Stephen. 1996. *Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos*. 3ª impresión, Nueva York, Springer Verlag.

Wilber, Ken. 2005. “The way we are in this together”, http://wilber.shambhala.com/html/books/kosmos/excerptC/intro-1.cfm/

Wilden, Anthony. 1979 [1972]. *Sistema y estructura. Ensayos sobre la comunicación e intercambio*. Madrid, Alianza.

Williams, Garnett. 1997. *Chaos theory tamed*. Washington DC, Joseph Henry Press.

Wilson, John. 1968. “Entropy, not negentropy”. *Nature*, 219: 535-536.

Winkin, Yves. 1976. *La Nueva Comunicación*. Barcelona, Kairós.

- 1991 (comp.). *Bateson. Primer inventario de una herencia (Coloquio de Cerisy)*. Buenos Aires, Nueva Visión.

Winner, Langdon. 1993. “If you liked Chaos, you’ll love complexity”. *New York Times Book Review*, 14 de febrero, p. 12.

Winograd, Terry y Fernando Flores. 1986. *Understanding computers and cognition*. Reading, Addison-Wesley.

Winterhalder, Bruce. 2002. “Behavioral and other human ecologies: Critique, response and progress through criticism”. *Journal of Ecological Anthropology*, 6: 4-23.

Wolfe, Cary. 1995. “In search of post-humanist theory. The second-order-cybernetics of Maturana and Varela”. *Cultural critique,* primavera.

Wolfram, Stephen. 1983. “Cellular automata”. *Los Alamos Science*, 9: 2-21.

- 1984. “Universality and complexity of cellular automata”. *Physica D*, 10: 1-35.

- 1988. “Complex systems theory”, en S. Wolfram (comp.), *Emerging Syntheses in Science: Proceedings of the Founding Workshops of the Santa Fe Institute*, Reading, Addison-Wesley, pp. 183-189

- 1994. *Cellular automata. Collected Papers*. Reading, Addison-Wesley.

- 2002. *A new kind of science*. Champaign, Wolfram Media.

Wolpert, David y William Maceady. 1995. “No-free-lunch theorems for search”. *Santa Fe Institute Technical Report*, SFI-TR-95-02-010.

- 1997. “Self-dissimilarity: An empirical measure of complexity”. Santa Fe Institute. http://www.santafe.-edu/sfi/publications/Abstracts/97-12-087abs.html.

Wood, John y R. G. Matson. 1973. “Two models of sociocultural systems and their implications for the archaeological study of change”. En: Colin Renfrew (comp.), *Op. cit.*, pp. 673-684.

Woodcock, Alexander y Monte Davis. 1985. *Catastrophe theory*. Harmondsworth, Penguin.

Yates, Eugene (comp.). 1987. *Self-Organizing Systems: The Emergence of Order*. Nueva York, Plenum Press.

Young, T. R. 1991. “Change and chaos theory: Metaphysics of the postmodern”. *The Social Science Journal*, 28: 289-305.

Zadeh, Lotfi. 1965. “Fuzzy sets”, *Information and Control*, 8: 338-353.

Zeeman, E. Cristopher. 1977. *Catastrofe theory: Selected papers, 1972-1977*, Reading, Addison-Wesley.

Zeidenberg, Matthew. 1990. *Neural network models in Artificial Intelligence*. Nueva York, Ellis Horwood.

Zeleny, Milan. 1977. “Self-organization of living systems: A formal model of autopoiesis”. *International Journal of General Systems*, 4: 13-28.

- 1978. “APL-AUTOPOIESIS: Experiments in self-organization of complexity”. En: *Progress in Cybernetics and Systems Research*, vol. III, pp. 65-84, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.

Ziegler, B. P. 1976. *Theory of modelling and simulation*. Nueva York, Wiley.

Zolo, Danilo, 1986. “Autopoiesis. Critica di un paradigma conservatore”. *MicroMega*, 1: 129-173.

- 1990. “Autopoiesis: Critique of a postmodern paradigm”. *Telos*, 86: 61-80.

Zuppa, Carlos. 2003. “Ilya Prigogine: ¿Nueva alianza o nueva religión?”. *Cinta de Moebio,* N° 18, diciembre. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Sociales. http://www.moebio.uchile.cl/18/frames04.htm.